



Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

PROYECTO FIN DE CARRERA

MEDICIÓN DE INCREMENTO TÉRMICO EN MATERIALES
METÁLICOS

Leganés, a 4 de Febrero de 2011.

Autor: José Luis Lastra Valero

Tutor: Rolando Guzmán López

Título: Medición de incremento térmico en materiales metálicos

Autor: José Luis Lastra Valero

Director: Rolando Guzmán López

EL TRIBUNAL

Presidente: D. José Luis Pérez

Vocal: D. Antonio Acosta

Secretario: D. Jorge Zhar

Realizado el acto de defensa y lectura del Proyecto Fin de Carrera el día 4 de Febrero de 2011 en Leganés, en la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid, acuerda otorgarle la CALIFICACIÓN de

VOCAL

SECRETARIO

PRESIDENTE

Agradecimientos

Agradezco la colaboración de mi familia, en especial de mis padres y mis parientes más cercanos. También agradezco el interés y la dedicación mostrada por Rolando Guzmán López, tutor de este proyecto, así como de los diferentes profesores del departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras. Cabe añadir, el agradecimiento a todos mis amigos en la Universidad y a mis amigos más cercanos, ya que con su atención e interés me fueron de mucha ayuda.

Por último, agradecer a la Universidad Carlos III la disponibilidad de las infraestructuras a las que hemos tenido acceso en el desarrollo de dicho proyecto, así como, los demás dispositivos que se han utilizado en la elaboración del presente documento.

Resumen

La expresión analítica de la ley de endurecimiento por deformación de un metal o aleación metálica incluye parámetros cuyos valores han de ser determinados para cada material. Estos parámetros se obtienen, generalmente, mediante ajuste a la gráfica tensión-deformación discreta obtenida en ensayos de tracción.

Se ha establecido una metodología de ensayos de compresión cuasiestática y dinámica de materiales metálicos, con medición simultánea del incremento térmico asociado a la deformación plástica. Como base de la metodología se ha diseñado y puesto a punto un sistema de ensayo constituido por una cámara de ensayo, una cámara oscura y así como los diferentes sistemas de medición acoplables a las máquinas de ensayo mecánico.

Palabras clave: Variación térmica y deformación.

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. Motivación.....	12
1.2. Objetivo.....	15
1.3. Contenido.....	16
2. ANTECEDENTES.....	18
2.1. Efecto termoelástico.....	19
2.2. Uso de tecnología IR.....	22
3. TERMOELASTICIDAD.....	24
3.1. Introducción.....	25
3.2. Elasticidad tridimensional.....	26
3.2.1. Efecto termoelástico tridimensional.....	27
3.3. Elasticidad plana.....	30
3.3.1. Efecto termoelástico plano.....	30
3.4. Análisis termodinámico.....	31
4. TEORÍA DE LA MEDICIÓN INFRARROJA.....	34
4.1. Introducción.....	35
4.2. Radiación.....	35
5. METODOLOGÍA.....	40
5.1. Introducción.....	41
5.2. Descripción de los ensayos.....	42
5.2.1. Dispositivos.....	42
5.2.1.1. Máquina de ensayo.....	43
5.2.1.2. Cámara de ensayos o cámara oscura.....	44
5.2.1.3. Control de temperatura.....	45
5.2.1.4. Cámara infrarroja.....	46
5.2.2. Procedimiento de ensayo.....	61
5.2.3. Factores que afectan al proceso.....	62
5.2.3.1. Características del material.....	62
5.2.3.2. Dimensiones del material.....	66
5.2.3.3. Características del ensayo mecánico.....	67
5.2.4. Calibración radiométrica de la cámara IR.....	70
6. RESULTADOS.....	78
6.1. Introducción.....	79
6.2. Ensayos cuasiestáticos.....	80
6.2.1. Resultados teóricos.....	80
6.2.2. Resultados experimentales.....	81
7. DISCUSIÓN.....	96
7.1. Introducción.....	97
7.2. Comparación resultados teóricos y experimentales.....	98
8. CONCLUSIONES.....	100
8.1. Introducción.....	101
8.2. Estudios futuros.....	103

8.3. Aplicaciones.....	104
9. BIBLIOGRAFÍA.....	106

INDICE DE FIGURAS

- Figura 3.1:** Estado tensional tridimensional
- Figura 3.2:** Tensor de tensiones tridimensional
- Figura 3.3:** Estado tensional plano
- Figura 4.1:** Reflexión y emisión de una superficie
- Figura 4.2:** Radiancia emitida por un cuerpo negro
- Figura 4.3:** Relación de la exitancia en función de la longitud de onda y la temperatura
- Figura 4.4:** Línea de desplazamiento de Wien en función de la Temperatura y de la Longitud de Onda
- Figura 5.1:** Descripción de los ensayos
- Figura 5.2:** Máquina universal de ensayos
- Figura 5.3:** Cámara de ensayos o cámara oscura
- Figura 5.4:** Controlador P.I.D.
- Figura 5.5:** Cámara infrarroja SC 6000
- Figura 5.6:** Interfaz de Controlador de la Cámara SC6000
- Figura 5.7:** Interfaz módulo RDac
- Figura 5.8:** Menú de opciones de adquisición y almacenamiento de datos
- Figura 5.9:** Disposición de 3 ROI's en una adquisición de datos
- Figura 5.10:** Tabla de las características de un ROI en tiempo real
- Figura 5.11:** Ventanas de corrección de "Bad Pixels"
- Figura 5.12:** Comparación entre dos imágenes (corregida y sin corregir)
- Figura 5.13:** Corrección manual de "Bad Pixels"
- Figura 5.14:** Interfaz del módulo RView
- Figura 5.15:** Aplicación Grafico Voxel Plot entre valores de ND y el número de frames
- Figura 5.16:** Selección de un ROI lineal en una imagen
- Figura 5.17:** Aplicación Grafico Line Profile
- Figura 5.18:** Aplicación Grafico Thick Profile
- Figura 5.19:** Barra de herramientas de video o frame by frame
- Figura 5.20:** Radiometric Calculator
- Figura 5.21:** Interfaz de usuario de RCal
- Figura 5.22:** Elección de unidades
- Figura 5.23:** Modificación de valores de la ecuación de Planck

Figura 5.24: Disposición de los dispositivos

Figura 5.25: Dimensiones de las probetas de los ensayos

Figura 5.26: Deformación máxima en una probeta

Figura 5.27: Detalle de las características de los ensayos

Figura 5.28: a) Detalle de la cámara de ensayos; b) Conexión eléctrica entre la entrada del controlador P.I.D. y la resistencia eléctrica ubicada en el interior de la cámara de ensayos; c) y d) Detalle del termopar.

Figura 5.29: Grafica de la distribución espectral de radiación de Planck y desplazamiento de Wien.

Figura 5.30: Grafica de la comprobación teórico-práctica del desplazamiento de Wien

Figura 6.1: Estado final de la probeta del ensayo n°1

Figura 6.2: Ley tensión deformación ingenieril del ensayo n°1

Figura 6.3: Ley tensión deformación verdadera del ensayo n°1

Figura 6.4: Ley tensión deformación plástica del ensayo n°1

Figura 6.5: Estado final de la probeta del ensayo n°2

Figura 6.6: Ley tensión deformación ingenieril del ensayo n°2

Figura 6.7: Ley tensión deformación verdadera del ensayo n°2

Figura 6.8: Ley tensión deformación plástica del ensayo n°2

Figura 6.9: Estado final de la probeta del ensayo n°3

Figura 6.10: Ley tensión deformación ingenieril del ensayo n°3

Figura 6.11: Ley tensión deformación verdadera del ensayo n°3

Figura 6.12: Ley tensión deformación plástica del ensayo n°3

Figura 6.13: Variación de temperatura vs tiempo AW 5754

Figura 6.14: Evolución de la temperatura en función de la carga aplicada en AW 5754

Figura 6.15: Variación térmica en función de su deformación plástica del material AA-2024-T3

Figura 6.16: Efecto termoelástico del material AA-2024-T3

Figura 6.17: Detalle del efecto termoelástico del material AA-2024-T3

Figura 6.18: Ley tensión-deformación plástica del material AA-2024-T3 para una velocidad de 10 s^{-1}

Figura 6.19: Ley tensión-deformación plástica del material AA-2024-T3 para una velocidad de 100 s^{-1}

Figura 6.20: Ley tensión-deformación verdadera de 3 materiales diferentes.

Figura 6.21: Gráfica incremento térmico vs deformación verdadera de 3 materiales diferentes.

Figura 8.1: Ejemplo de aplicaciones existentes de AW-5754

Figura 8.2: Depósitos de expansión de AW-5754

Figura 8.3: Aplicaciones de AA-2024-T3

Figura 8.4: Aplicaciones varias de AA-2024-T3

INDICE DE TABLAS

Tabla 5.1: Propiedades mecánicas del material AW 5754

Tabla 5.2: Propiedades térmicas y eléctricas del material AW 5754

Tabla 5.3: Componentes de la aleación AW 5754

Tabla 5.4: Propiedades mecánicas del material AA-2024-T3

Tabla 5.5: Propiedades térmicas y eléctricas del material AA-2024-T3

Tabla 5.6: Componentes de la aleación AA-2024-T3

Tablas 5.7 y 5.8: Proceso de calentamiento

Tablas 5.9 y 5.10: Proceso de enfriamiento

Tablas 5.11 y 5.12: Valores de radiancia para los dos procesos de calentamiento

Tablas 5.13 y 5.14: Valores de radiancia para los dos procesos de enfriamiento

Tabla 5.15: Comprobación teórico-práctica de la Ley de Wien

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. MOTIVACIÓN

En el proceso de diseño de elementos estructurales se estudia su respuesta cuando están sometidos a diferentes solicitaciones de carga. La realización de ensayos del elemento en gran escala no es siempre una alternativa viable, en algunos casos por su complejidad y siempre por su coste. El procedimiento más frecuente es el análisis, mediante modelos apropiados, del comportamiento del sólido sometido a las cargas actuantes sobre él y con las consiguientes condiciones de contorno. Como resultado del análisis, se obtienen habitualmente los campos de tensión, deformación y temperatura en el sólido, la posible evolución de parámetros de daño,...

Además de las dimensiones geométricas de un sólido, también son importantes las condiciones de contorno, las acciones, su comportamiento térmico y mecánico. Las constantes físicas que dan calidad a un sólido mecánicamente hablando son: la rigidez, el límite elástico, la resistencia a tracción, la ductilidad, la capacidad de endurecimiento...

La dependencia de la tensión en el material con respecto a la deformación, la velocidad de deformación, la temperatura, el daño y a otros parámetros que influyen en el comportamiento del material, se concreta, habitualmente, en una función denominada ley de comportamiento del material, ley de endurecimiento del material ó, en lo que sigue, **ley tensión-deformación** del material. En general, una ley tensión-deformación es una relación entre las variables termodinámicas y mecánicas de un sistema físico: tensión, deformación, temperatura, densidad, entropía, etc. La ley tensión-deformación de un material no es deducible de leyes de conservación u otro tipo de leyes universales y que son específicas del tipo de problema estudiado.

Mediante dicha ley tensión-deformación del material se analizan las constantes físicas anteriormente mencionadas, para, posteriormente, dar paso a calcular experimental y teóricamente el efecto termoelástico existente en el material.

Para la realización de dicho análisis existen tres tipos de modelos que son seguidos, en la actualidad, para describir el comportamiento mecánico de un material:

Modelo teórico o físico

Es el modelo que se sigue cuando el planteamiento de la ley tensión-deformación se fundamenta en el estudio de la física de los materiales y, más concretamente, en la teoría de las dislocaciones, que están en el origen del comportamiento termoviscoplastico del material.

Las leyes así deducidas permiten explicar propiedades macroscópicas partiendo de mecanismos microscópicos. Ante la complejidad y diversidad del comportamiento de los defectos o dislocaciones, el formalismo de la formulación de la ley tensión-deformación puede diferir dependiendo de los microprocesos que son tenidos en cuenta. Una dificultad añadida está en la necesidad de conocer las leyes de evolución de la microestructura del material.

Modelo empírico o fenomenológico

El planteamiento de la ley tensión-deformación se realiza a partir de observaciones experimentales pero sin buscar sus fundamentos físicos. Se estudia un elemento de volumen representativo del material a través de relaciones causa-efecto que existen entre las variables (tanto de entrada como de salida en el proceso de deformación) que sean físicamente observables o medibles.

Las variables físicamente observables en el elemento de volumen son las que se pueden deducir simplemente de las medidas clásicas de la mecánica: desplazamiento, fuerza, tiempo y temperatura. Así, por ejemplo, pueden considerarse la deformación total, la deformación elástica reversible, la deformación plástica y la tensión.

Modelo semiempírico o semi-fenomenológico

Se ajusta también una ley teórica a datos experimentales pero teniendo en cuenta consideraciones microestructurales que pueden reducir el número de ensayos.

Las expresiones deducidas siguiendo cualquiera de estos tres modelos, incluyen diversos parámetros cuyos valores han de ser determinados para cada material.

En resumen, en dicho proyecto se ha utilizado el modelo empírico o fenomenológico, debido a la realización de ensayos mecánicos que han hecho posible el estudio de la ley tensión-deformación del material. En dichos ensayos mecánicos, el principal motivo de estudio en la propia ley tensión-deformación es la zona de deformación elástica reversible.

1.2. OBJETIVO

El trabajo expuesto en esta memoria ha sido realizado en el departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid. En este marco se ha desarrollado un trabajo en el que convergen la física aplicada y la Mecánica de Medios Continuos y en el que se aplica una metodología de ensayo que integra diferentes dispositivos de ensayo desarrollados, así como sistemas de adquisición de datos.

El objetivo general de este trabajo es:

“La medición de incremento térmico en materiales metálicos”

Para cumplir con este objetivo se asumen los siguientes objetivos secundarios:

- Comprender y seguir los fundamentos teóricos que rigen tanto el efecto de la termoelasticidad como la teledetección Infrarroja.
- Establecer una metodología que permita la realización de ensayos de tracción cuasiestáticos en materiales metálicos con medición simultánea sincronizada del incremento de temperatura.
- Aplicar la metodología establecida a una aleación alumínica.
- Estimar los valores de los parámetros de la Ley generalizada de Hooke para efectos térmicos y las leyes de medición infrarroja tales como Ley de Planck y Ley de Stefan-Boltzmann.
- Obtener la ley tensión-deformación (σ - ϵ) del material, así como la ley temperatura-deformación elástica y plástica (ΔT - ϵ).
- Revisión bibliográfica de trabajos realizados por diferentes autores hasta la fecha.

1.3. CONTENIDO

El documento se ha dividido en 9 capítulos:

- ✓ En el primero se realiza una presentación de la motivación y los objetivos a cumplir en el documento.
- ✓ En el segundo se presenta un desarrollo histórico y los antecedentes del efecto termoelástico y de las aplicaciones desarrolladas a lo largo de la historia sobre el uso de la tecnología infrarroja para la medición y calibración del efecto termoelástico.
- ✓ El tercer capítulo incluye la teoría de la termoelasticidad, desde el desarrollo de la Ley generalizada de Hooke hasta un análisis termodinámico del efecto termoelástico en sí, con las correspondientes condiciones de contorno existentes en el problema desarrollado en dicho proyecto.
- ✓ El cuarto capítulo desarrolla la teoría de la radiación infrarroja. Se estudian todas las leyes seguidas por la cámara IR para captar variaciones de temperatura en procesos cuasiestáticos.
- ✓ En el quinto capítulo, se especifican los procedimientos a seguir en los ensayos mecánicos que se realizan, así como los diferentes dispositivos de los que constan los ensayos. Los dispositivos más importantes son: la cámara oscura, la máquina de ensayos y la cámara infrarroja.
- ✓ En el sexto capítulo, se presentan los resultados obtenidos de forma práctica, como son la ley tensión-deformación y la ley temperatura-deformación elástica del material, y teórica, aplicación de las leyes de la física al problema termoelástico.
- ✓ En el séptimo capítulo, se realiza un análisis de los resultados obtenidos, y sus respectivas conclusiones.

- ✓ En el octavo capítulo, se analizan futuras propuestas e innovaciones a aplicar en los fenómenos que a continuación se tratan en el siguiente proyecto.
- ✓ En el noveno, y último, capítulo se detalla la bibliografía, que ha sido de gran ayuda para la elaboración de dicho documento.

CAPITULO 2

ANTECEDENTES

2.1. EFECTO TERMOELÁSTICO

- **W. Weber** en **1830**, publicó un escrito donde hacía referencia a experimentos con fibras de hierro repentinamente traccionadas y comprimidas. En estas investigaciones encontró un efecto térmico que era proporcional a la carga aplicada en dichas fibras. Demostró como disminuía la temperatura al traccionar dichas fibras y como aumentaba al comprimirlas.
- **Lord Kelvin (William Thompson)** en **1850**, tomó los documentos de Weber y se propuso encontrar una explicación teórica a dichos efectos.

En **1853** publicó “*Dynamical Theory of Heat (...)*”, utilizando la tesis de Mr. Joule (“El calor es un estado en movimiento que, si no es alterado, es producido por la misma cantidad de trabajo utilizado”). En esta publicación, Lord Kelvin afirmaba: “La temperatura de una sustancia puede verse aumentada, solamente, consiguiendo producir, de alguna manera, aumentos térmicos dentro de esta. El trabajo necesario para producir dichos efectos mecánicos es proporcional a la cantidad de sustancia que se ha visto alterada debido al incremento de una temperatura a otra”.

En **1855**, publicó “*Thermoelastic, Thermomagnetic and Pyroelectric Properties of Matter*”, donde expresó una conclusión (en forma de ecuación) a su publicación anterior:

$$Q = -T_0 \cdot \left[\frac{\partial \omega}{\partial T} \right]$$

Donde Q es el calor generado por volumen durante la deformación de un material, T_0 es la temperatura absoluta y $\frac{\partial \omega}{\partial T}$ es el trabajo mecánico respecto de la temperatura.

Expresando dicha ecuación en condiciones adiabáticas, resulta:

$$\partial \omega = \sigma_i \cdot \partial \varepsilon_i$$

Quedando la expresión inicial:

$$Q = -T_0 \cdot \sigma_i \left[\frac{\partial \varepsilon_i}{\partial T} \right]; \quad \text{donde } \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial T} \text{ es el coeficiente de expansión térmica lineal } (\alpha_i) \\ \text{y tomando } \sigma_m \text{ como la tensión media de las tensiones principales } (\sum \sigma_{ii} / 3).$$

Resultando ser la **ecuación termoelástica clásica** como la siguiente expresión:

$$\Delta T = -\frac{T_0 \cdot \alpha_l}{C} \cdot \Delta \sigma_{ii}$$

Siendo C la capacidad calorífica volumétrica del material en cuestión.

Como se aprecia, existe una proporcionalidad entre la variación de tensión y la temperatura en un material expuesto a deformación elástica. Esta ecuación está limitada a un cuerpo isótropo, homogéneo, linealmente elástico y adiabático, debido a sus condiciones de carga. Los parámetros de estos materiales no pueden verse afectados por cambios en la deformación, tensión y temperatura durante la aplicación de la carga.

- **J.P. Joule**, entre **1857** y **1859**, publicó las primeras verificaciones acerca de la ecuación termoelástica clásica de Lord Kelvin. Estos experimentos fueron realizados en materiales como: metales, caucho y madera, hallándose variaciones de entre 3-15% de la teoría.
- **Compton y Webster** en **1915**, usaron un método con resistencias eléctricas para la medición de la variación de temperatura en estructuras expuestas a cargas dinámicas. Los resultados dieron una variación de $\pm 1,5\%$ comparado con la teoría. El mayor problema que encontraron en las mediciones no fue el propio sistema de contacto de aplicación de la carga, sino que fue el sistema de conversión de señales analógicas a variaciones de temperatura. Se utilizaban galvanómetros con bajos tiempos de respuestas que causaron resultados irreales.
- **O.W.Dillon y T.R.Tauchert** en **1966**, utilizaron un termopar junto con un amplificador y un osciloscopio para visualizar cambios en la temperatura de los materiales. Se conseguía, así, un tiempo de respuesta de 10 ms y resultados en común acuerdo con la linealidad de la ecuación clásica de la termoelasticidad.

Los ensayos de carga no se desarrollaron mucho más, puesto que se comprobó que dicho contacto alteraba las condiciones térmicas de la fuente de medición, produciéndose diferencias entre la temperatura medida y la real de $\pm 1,5\%$.

2.2. USO DE LA TECNOLOGÍA INFRARROJA

- Los primeros conocimientos acerca de métodos de medición de no-contacto datan de **1904** por *E.G.Coker*, quien utilizó radio-micrómetros para detectar la radiación producida en el efecto termoelástico.
- *M.H.Belgen* fue el primero en utilizar tecnología infrarroja en el análisis del efecto termoelástico producido en la carga de estructuras. En **1967**, describe el uso de radiómetros infrarrojos. Los resultados prometían pero el método tenía limitaciones como la frecuencia de carga (200 Hz) y el propio sistema de detección.

Belgen en **años posteriores** llegó a las siguientes conclusiones:

- El uso de C_p en la ecuación clásica tenía que ser tomada en consideración. Las tensiones principales dadas en el ensayo producían una presión constante, por lo que dicha ecuación requería de cargas adiabáticas y debía estar limitada a pequeñas variaciones de tensión.
- Experimentó variaciones de segundo orden, propias de las constantes del material y de las constantes elásticas. Concluyó que las variaciones de segundo orden deben ser despreciadas en la evaluación infrarroja de variaciones de tensión pero tienen que ser consideradas en ensayos precisos.
- Focalizó los efectos no adiabáticos, que imponían limitaciones a bajas frecuencias de carga. El efecto de la conducción fue el más importante y comenzó a serlo más aún cuanto más finas eran las estructuras. El retardo térmico producido en la superficie del objeto de estudio incrementaba al hacerlo la frecuencia y el grosor de la superficie de dicho objeto.

- En los **años 80**, un sistema de detección de medición infrarroja llamado **SPATE** salió al mercado. Se trata de un ordenador que estima el campo de tensiones, mediante mapas de contorno con colores, mostrando la distribución de las tensiones principales sobre una superficie accesible en una estructura sometida a cargas dinámicas.

El equipo tiene un detector capacitivo infrarrojo que mide variaciones de temperatura asociadas con el efecto termoelástico. Dicho sensor convierte la radiación incidente en señal eléctrica. Dicha señal está alimentada por un analizador que mezcla la señal analógica del detector con una señal analógica proveniente de la célula de carga, para formar la señal resultante.

SPATE puede utilizarse en cualquier material. Dicho material será preparado con un cuerpo negro para aportar mayor emisividad a este. La temperatura mínima detectable es de 1 mK, que corresponde con una variación de tensión de 1MPa. La región máxima que se puede captar es de 256x256 píxeles. Se requiere entre una hora y media y diez horas para efectuar el análisis de la pertinente carga del material a estudiar.

- **FAST** es un sistema de detección de medición infrarroja con las principales funciones de SPATE, pero incluyendo un detector focal plano de Pt y Si. La diferencia con SPATE es que éste adquiere datos pixel a pixel y FAST adquiere datos con una frecuencia de 25 Hz en una ventana concreta y para un tiempo definido. Esto permite captar datos en cuestión de minutos. El problema existente es el multisensor, debido a la diferencia existente entre la sensibilidad de ambos sensores.
- **Delta Therm 1000** es un nuevo sistema presentado en **1994**. Incluye un detector de In y Sb. También utiliza el método de cruce de señales existente en SPATE y FAST. En cambio, reemplaza el analizador por un FFT (Fast Fourier Transform) que utiliza señal digital. Además, utiliza una técnica de alta velocidad para contrarrestar cada detector antes de visualizar las imágenes. Esto garantiza una mayor resolución y permite que se solucionen los problemas de variaciones en los píxeles al existir correcciones no-uniformes de estos.

CAPÍTULO 3

TEORIA DE LA

TERMOELASTICIDAD

3.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se desarrolla la teoría termoelástica aplicada a cuerpos isótropos, homogéneos y expuestos a condiciones adiabáticas. Estas tres hipótesis aplicadas a la teoría se han considerado debido a las siguientes razones:

- **Cuerpos isótropos:** no presentan variaciones sus propiedades físicas en función de variables como la dirección de aplicación de la carga o la temperatura. Se considera dicha hipótesis debido a la dificultad de hallar la dependencia de las propiedades físicas del material a utilizar en función de variables como tensión, deformación o temperatura.
- **Homogéneo:** Se considera un cuerpo cuya estructura y composición es uniforme.
- **Condiciones adiabáticas:** se desprecian efectos tales como la transferencia externa de calor al sistema cámara-ensayo mecánico, convección externa e interna, etc. Para hacer efectiva esta hipótesis se especifican los dispositivos que se aplican en los ensayos mecánicos en el apartado.

3.2. ELASTICIDAD TRIDIMENSIONAL

Para formular la ley de Hooke tridimensional se considera un paralelepípedo rectangular e infinitesimal de material elástico, lineal e isótropo. A este cuerpo se le aplican sucesivamente tres tensiones perpendiculares a cada una de sus caras (tensiones normales) y otras tres tensiones paralelas a cada una de sus caras (tensiones tangenciales). Para cada una de estas tensiones se aplican las dos siguientes condiciones:

- Las tensiones normales () ocasionan deformaciones normales ().
- Las tensiones tangenciales () ocasionan deformaciones tangenciales ().

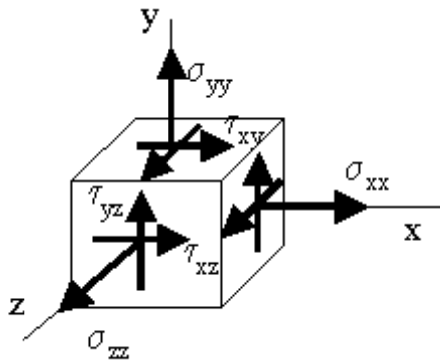


Figura 3.1: Estado tensional tridimensional

$$\sigma_{XYZ} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_{yy} & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_{zz} \end{bmatrix}$$

Figura 3.2: Tensor de tensiones tridimensional

Estudio de tensiones normales

Mediante la relación existente mediante el modulo de Young (E) se obtiene:

Con la relación existente mediante el coeficiente o radio de Poisson (v) se obtiene:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

Aplicando las tres tensiones simultáneamente, obviando el efecto de las tensiones tangenciales y aplicando el principio de superposición resulta:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_{xx} - \nu \cdot (\sigma_{yy} + \sigma_{zz})]$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_{yy} - \nu \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{zz})]$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_{zz} - \nu \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy})]$$

Estudio de tensiones tangenciales

Aunque el valor de las tensiones y deformaciones tangenciales es insignificante comparado con los valores normales, se procede a estudiar la ley de Hooke aplicada a las componentes tangenciales del tensor de tensiones:

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

$$\gamma_{yz} = 2\varepsilon_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}$$

$$\gamma_{xz} = 2\varepsilon_{xz} = \frac{\tau_{xz}}{G}$$

Siendo G el módulo de rigidez o tangencial y el mismo para todas las tensiones paralelas a las caras aplicadas en el paralelepípedo, debido a la condición de isotropía.

3.2.1. EFECTO TERMOELÁSTICO TRIDIMENSIONAL

En el caso anterior, se considera un material con temperatura uniforme. Las deformaciones obtenidas son puramente elásticas, es decir, son resultantes de la aplicación de una carga externa.

A continuación, se estudia el caso donde existe un campo de temperatura no uniforme en el cuerpo isótropo. En este caso, se asume que la variación de temperatura existente en el material no es lo suficientemente elevada como para provocar un cambio en las propiedades físicas (como por ejemplo el módulo elástico o de Young) del material.

Por tanto, la expresión de la deformación total existente en el material será la siguiente:

$$\varepsilon = \varepsilon' + \varepsilon'' + \varepsilon'''$$

Las deformaciones ε' y ε''' son las obtenidas mediante la ley de Hooke, estudiada en el anterior apartado, donde ε' sería la componente de la deformación inicial (antes de aplicar cargas externas) y ε''' sería la componente de la deformación debida a la aplicación de cargas externas en el material. Luego, falta por conocer la forma de calcular ε'' , que se hará aplicando la expresión de la deformación longitudinal existente para variaciones de temperatura pequeños:

$$\Delta \delta L = \alpha \cdot \delta L \cdot \Delta T$$

$$\varepsilon'' = \lim_{\delta L \rightarrow 0} \frac{\Delta \delta L}{\delta L} = \alpha \cdot \Delta T$$

Una vez demostrada la expresión de la componente de la deformación correspondiente a la variación de temperatura, se procede a la expresión generalizada de la Ley de Hooke:

Expresada en términos de deformaciones

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1 + \nu}{E} \cdot \sigma_{ij} - \frac{\nu}{E} \cdot \sigma_{kk} \cdot \delta_{ij} + \alpha \cdot \Delta T \cdot \delta_{ij}$$

Donde δ_{ij} es el parámetro “delta de Kronecker”: una función matemática que presenta los siguientes valores en funciones de las variables i y j:

$$\begin{aligned} \delta_{ij} &= 1 && \text{cuando } i = j \\ \delta_{ij} &= 0 && \text{cuando } i \neq j \end{aligned}$$

Es decir, para tensiones y deformaciones normales o principales de ambos tensores aplicados sobre el material, la ecuación anterior permanece tal cual está. En cambio, para tensiones o deformaciones tangenciales, los términos que aparecen junto con el parámetro delta de Kronecker, desaparecen.

En definitiva, la aplicación de tensiones normales es la que produce la variación de temperatura en el material a estudiar (σ_{ij}).

Expresada en términos de tensión

La ley de Hooke generalizada para efectos térmicos en términos de tensión presenta la siguiente forma:

$$\sigma_{ij} = 2G \cdot \varepsilon_{ij} + \lambda \cdot \varepsilon_{kk} \cdot \delta_{ij} - \beta \Delta T \cdot \delta_{ij}$$

Dónde $\beta = (3\lambda + 2G) \cdot \alpha$. El término α es el *coeficiente de dilatación térmica lineal* del material. Los términos λ y G (o μ como constante de Lamé) vienen expresados, a continuación, en función de los parámetros físicos del material (radio de Poisson, ν , y módulo de elasticidad o de Young, E):

$$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)}$$

$$G = \mu = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

3.3. ELASTICIDAD PLANA

En los ensayos mecánicos que se realizan en dicho proyecto se utiliza la teoría termoelástica plana, debido a dos razones: no se aplican tensiones en la dirección del espesor del material (es decir en la dirección z) y la propia dificultad de conocer la deformación existente en la dirección del espesor. Por tanto, las tensiones que se aplican en el material son longitudinales:

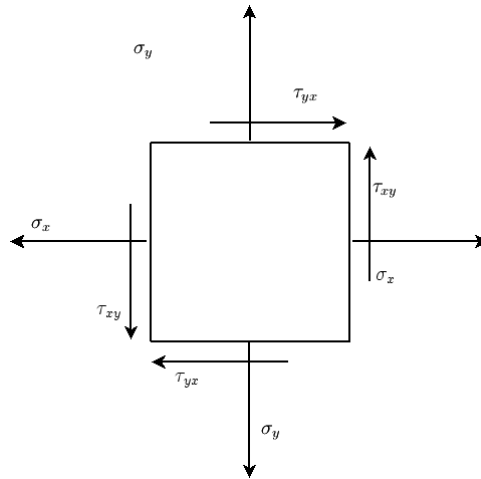


Figura 3.3: Estado tensional plano

La ley generalizada de Hooke aplicada a tensiones en dirección x e y es la siguiente:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_x - \nu \cdot (\sigma_y)]$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} \cdot [\sigma_y - \nu \cdot (\sigma_x)]$$

$$\gamma_{xy} = 2\varepsilon_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}$$

3.3.1. EFECTO TERMOELÁSTICO PLANO

Por tanto en la ley generalizada de Hooke para efectos térmicos (apartado 3.2.1) se desprecia el efecto de la deformación existente en la dirección z:

$$\sigma_{ij} = 2G \cdot \varepsilon_{ij} - \beta \Delta T \cdot \delta_{ij} \quad (\text{Expresada en términos de tensiones})$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E} \cdot \sigma_{ij} + \alpha \cdot \Delta T \cdot \delta_{ij} \quad (\text{Expresada en términos de deformaciones})$$

3.4. ANÁLISIS TERMODINÁMICO

A continuación, se realiza un análisis termodinámico del volumen de control que, en este caso, es el conjunto máquina de ensayos–cámara radiométrica. Se toman las siguientes hipótesis:

- Condiciones adiabáticas ($\Delta Q = 0$)
- Sistema aislado térmicamente (no existe transferencia de calor alguna desde el exterior hasta al sistema)
- Cuerpo isótropo y homogéneo (al igual que en los apartados anteriores)

Combinando la primera y la segunda ley de la termodinámica resulta:

$$dS = \frac{1}{T} \cdot \frac{\partial U}{\partial T} \cdot dT + \frac{1}{T} \cdot \left[\frac{\partial U}{\partial \epsilon_{ij}} - \sigma_{ij} \right] d\epsilon_{ij}$$

$U \equiv$ Energía interna del sistema

Expresando la anterior ecuación como una diferencial exacta queda:

$$\frac{\partial U}{\partial \epsilon_{ij}} - \sigma_{ij} = -T \cdot \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial T}$$

Además, mediante la expresión del número de Biot, se introduce un nuevo término, el calor específico a volumen constante (C):

$$C = \frac{\partial U}{\partial T}$$

Por tanto, la expresión inicial queda de la siguiente manera:

$$dS = C \cdot \frac{dT}{T} - \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial T} \cdot d\epsilon_{ij}$$

El objetivo es el de estudiar el efecto producido al realizar una variación de tensión, en función de la temperatura. Luego el siguiente paso a seguir es el de calcular la variación de tensión con respecto a la temperatura en la ecuación generalizada de Hooke para efectos térmicos (apartado 3.3.1, puesto que el ensayo mecánico se realiza en un estado de tensiones plano):

$$\sigma_{ij} = 2G \cdot \varepsilon_{ij} - \beta \Delta T \cdot \delta_{ij}$$

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial T} = -\beta \cdot \delta_{ij}$$

Los términos que se utilizan en esta ecuación son los de la diagonal principal del tensor de tensiones, que, a su vez, provocan los términos de la diagonal principal del tensor de deformaciones ($i=j$).

$$dS = C \cdot \frac{dT}{T} + \beta d\varepsilon_{ii}$$

Integrando la expresión resulta:

$$\Delta S = C \log \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0} \right) + \beta \cdot \Delta \varepsilon_{ii}$$

Debido a que se tratan de variaciones de temperatura pequeñas ($\Delta T \ll T_0$), el término logarítmico se desprecia, quedando la expresión en términos de entropía:

$$\Delta S = C \cdot \frac{\Delta T}{T_0} + \beta \cdot \Delta \varepsilon_{ii}$$

Multiplicando por T_0 y quedando en términos de calor la anterior ecuación y aplicando la condición adiabática del sistema ($\Delta Q = 0$):

$$\Delta Q = C \Delta T + T_0 \cdot \beta \cdot \Delta \varepsilon_{ii} = 0$$

Finalmente, la **expresión general del efecto termoelástico** debido a una variación en la aplicación de tensiones en el material es la siguiente:

$$\Delta T = -\frac{T_0 \cdot \beta \cdot \Delta \varepsilon_{ii}}{C} = -\frac{T_0 \cdot \alpha \cdot \Delta \sigma_{ii}}{\rho \cdot C_p}$$

El término $\Delta \sigma_{ii}$ se trata de la variación existente en cada uno de los componentes de la diagonal principal del tensor de tensiones. Esto es, el primer invariante ΔI_1 .

$$\Delta I_1 = (\Delta \sigma_{ii}) = (\Delta \sigma_{11} + \Delta \sigma_{22} + \Delta \sigma_{33})$$

Para simplificar la ecuación general del efecto termoelástico, los términos α , ρ y C_p se pueden expresar como K_0 o constante termoelástica:

$$\Delta T = -T_0 \cdot K_0 \cdot \Delta \sigma_{ii}; \quad K_0 = \frac{\alpha}{\rho \cdot C_p}$$

CAPÍTULO 4

TEORÍA DE LA MEDICIÓN INFRARROJA

4.1. INTRODUCCIÓN

La variación de temperatura captada por la cámara IR tiene una relación dependiente con la medición de radiación. En este capítulo se realiza una exposición de la teoría de la radiación infrarroja.

4.2. RADIACIÓN

El término radiación se refiere a la emisión continua de energía que se realiza desde la superficie de todos los cuerpos de la naturaleza, esta energía se llama radiante y es transportada por ondas electromagnéticas. Cuando incide sobre la superficie de un cuerpo, parte es reflejada y el resto se transmite.

Existen dos formas de emisión de dicha energía: desde el exterior (procedente de objetos externos al cuerpo) o desde el interior (desde el propio cuerpo). También influirá la calidad del cuerpo, debido a que dependiendo de ésta su entorno reflejará o emitirá en mayor o menor medida:

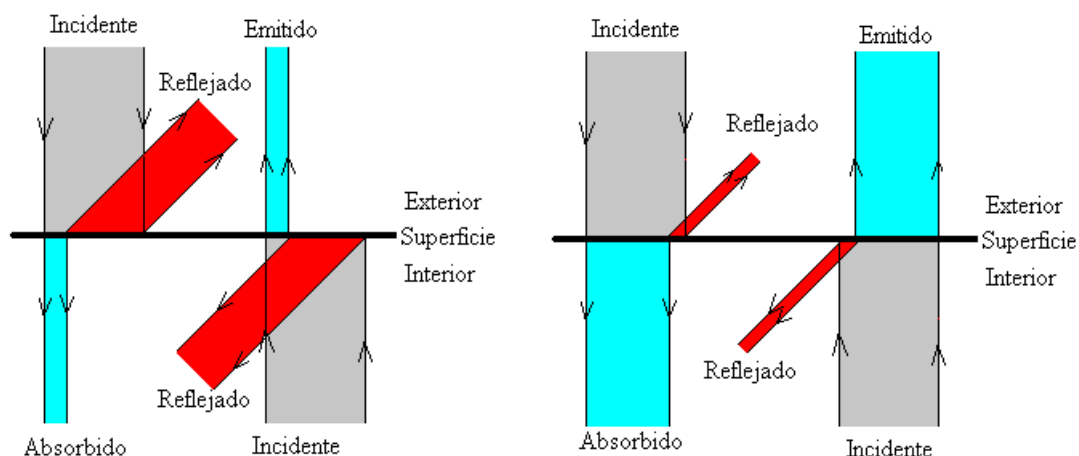


Figura 4.1: Reflexión y emisión de una superficie

En la imagen de la izquierda, se observa que si la superficie es lisa y pulimentada como la de un espejo, la mayor parte de la energía incidente se refleja y el resto es absorbido por el propio cuerpo. En la de la derecha, se observa que la superficie del material no contiene la suficiente “calidad” anteriormente mencionada, de ahí que gran parte de la energía incidente sea absorbida por el material.

La superficie de un cuerpo negro es un caso límite, en el que toda la energía incidente del exterior es absorbida y toda la energía de interior es emitida:

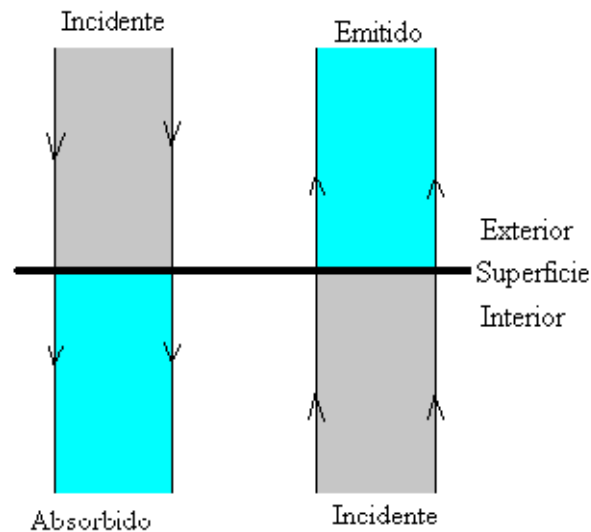


Figura 4.2: Radiancia emitida por un cuerpo negro

El cuerpo negro perfecto no existe en la naturaleza, por lo que la cámara IR comparará la radiancia emitida por la fuente de emisión (el material a estudiar) con la emitida por un cuerpo negro ideal.

Exitancia

Se trata del flujo radiante por unidad de área que emite un cuerpo negro en función de la temperatura a la que se encuentra y la longitud de onda (λ). La ecuación que relaciona T , λ y la exitancia de un cuerpo negro es la **Ley de Planck**:

$$M_{CN}(\lambda, T) = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right)} - 1}$$

Donde $C_1 = 2\pi \cdot h \cdot c_0^2 = 3.7413 \cdot 10^{-16} W \cdot m^2$ y $C_2 = h \cdot c_0 / k = 1.4388 \cdot 10^{-2} m \cdot K$.

En la siguiente figura se puede observar la exitancia, en $W/m^2 \cdot \mu m$, existente en un cuerpo negro en función de la temperatura y de la longitud de onda, λ :

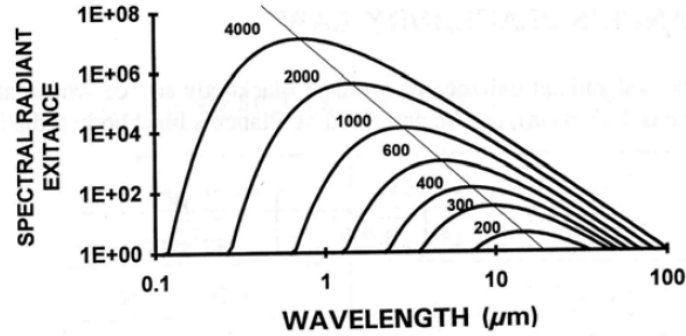


Figura 4.3: Relación de la exitancia en función de la longitud de onda y la temperatura

A partir de la Ley de Planck, se obtienen las siguientes leyes: Ley de desplazamiento de Wien y Ley de Stefan-Boltzmann.

Ley de desplazamiento de Wien

Las curvas de distribución espectral de la radiación del cuerpo negro (Figura 4.3) alcanzan un valor máximo de emisión para cada temperatura y a una longitud de onda determinada. El desplazamiento de dicho valor máximo de emisión o exitancia lo describe la Ley de Wien, la cual se obtiene mediante derivación de la Ley de Planck, resolviéndose para el máximo:

$$\frac{\partial M_{CN}(\lambda, T)}{\partial \lambda} = 0 \rightarrow \lambda_{max} = \frac{2898 [\mu m \cdot K]}{T[K]}$$

La línea de desplazamiento que describen dichos máximos en las curvas de distribución espectral de Planck se analiza a continuación en la siguiente figura:

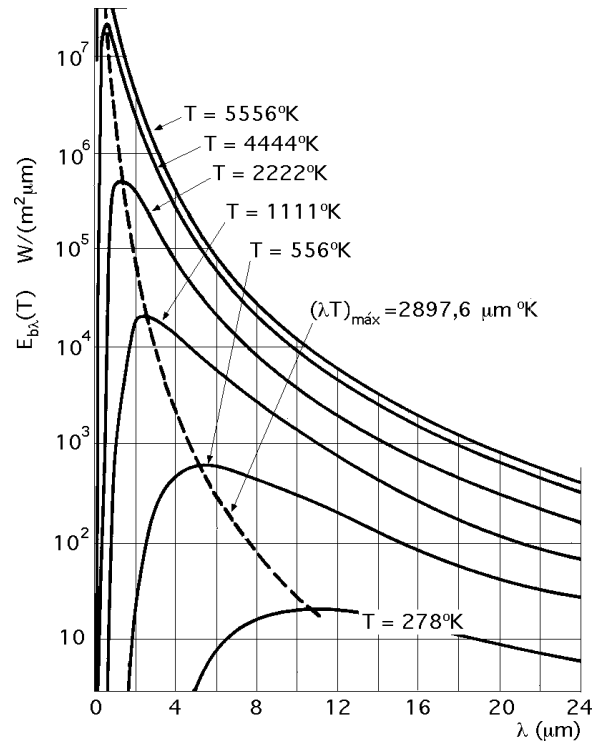


Figura 4.4: Línea de desplazamiento de Wien en función de la Temperatura y de la Longitud de Onda

Ley de Stefan-Boltzmann

Una vez conocidos los valores de emisión debidos a diferentes temperaturas y longitudes de onda, se procede a integrar la expresión de la distribución de la radiación espectral de Planck con $\lambda_1 = 0$ y $\lambda_2 = \infty$, obteniéndose así la intensidad emitida por un cuerpo negro (I):

$$I_{CN} = \sigma \cdot T^4 ; \quad \sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4} \right]$$

La cámara IR internamente realiza, como se ha comentado anteriormente, una comparación entre la radiación emitida por una fuente real (material a estudiar) respecto la emitida por un cuerpo negro perfecto. Mediante dicha comparación se introduce un nuevo término: la emisividad.

Emisividad

Cociente de la radiación emitida por una fuente real a una temperatura T, respecto la radiación emitida por un cuerpo negro ideal a la misma temperatura T:

$$\epsilon = \frac{M(\lambda, T)_{FUENTE}}{M(\lambda, T)_{CUERPO NEGRO}} \leq 1$$

El valor de la emisividad nunca puede ser mayor que la unidad, por conservación de la energía. Es siempre menor que la unidad debido a la inexistencia de cuerpo alguno en la naturaleza que tenga las propiedades del cuerpo negro. Cuanto mayor emisividad presente un cuerpo, mayor exitancia alcanzará.

CAPITULO 5

METODOLOGIA

5.1. INTRODUCCIÓN

Las condiciones iniciales que se proponen para obtener una variación de temperatura en el material es el siguiente:

- Se considera la variación de temperatura por deformación elástica como un proceso adiabático, despreciando pérdidas de calor por conducción y convección, así como variaciones de temperatura existente debido al efecto de la deformación plástica del material.
- Los ensayos que se realizan son cuasiestáticos, pues los dinámicos son los relativos a la variación de temperatura debido a deformación plástica. En este proyecto, la velocidad de deformación es lo suficientemente baja como para que el ensayo sea considerado estático o cuasiestático.

En este capítulo se describen los dispositivos, técnicas experimentales y sistemas de medición necesarios en los ensayos mecánicos para determinar la variación de temperatura del material.

5.2. DESCRIPCIÓN DE LOS ENSAYOS

Los ensayos que se han realizado en el presente proyecto fueron cuasi-estáticos. En ningún caso se tomaron en cuenta las velocidades de deformación de las probetas a deformar. La descripción gráfica de dichos ensayos se encuentra en la siguiente figura:

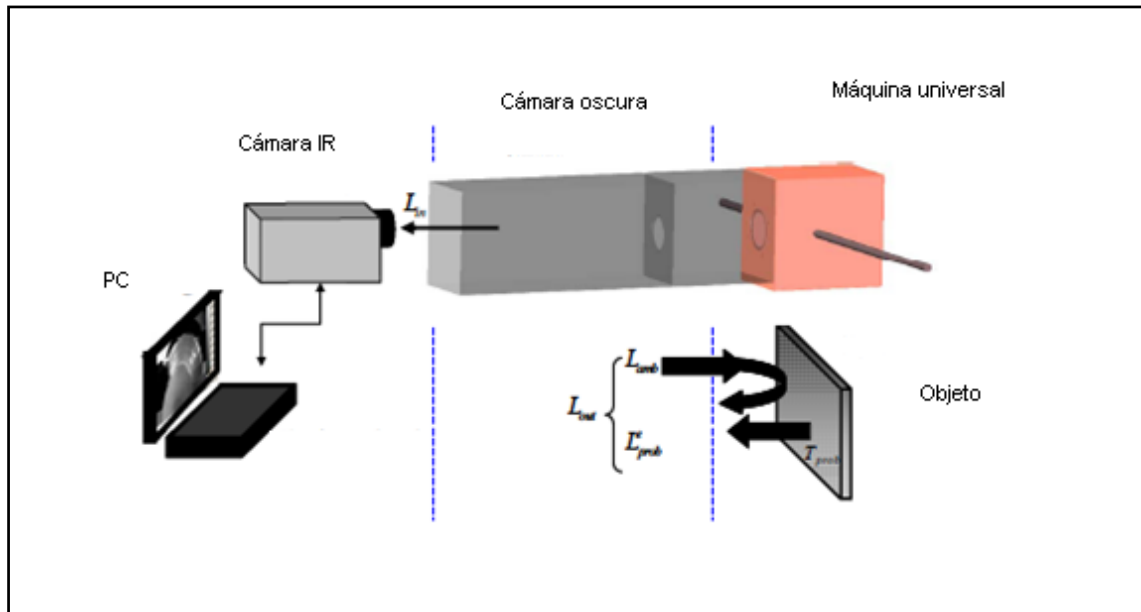


Figura 5.1: Descripción de los ensayos.

Por un lado se observa la cámara de ensayos o cámara oscura, cuya función es la de aislar térmicamente todo el proceso de captación de la cámara infrarroja. Por otro lado, se observa la máquina universal de ensayos con las probetas de aluminio ya cargadas en ella.

5.2.1. DISPOSITIVOS

Los dispositivos que se han utilizado en la ejecución de los ensayos de dicho proyecto son los siguientes: máquina universal de ensayos, cámara de ensayos, controlador de temperatura PID, cámara infrarroja y elementos de sujeción y acoplamiento de los distintos dispositivos mencionados, como el trípode propio de la cámara infrarroja.

5.2.1.1. MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS

La maquina universal de ensayos es una máquina semejante a una prensa con la que es posible someter materiales a ensayos de tracción y compresión para medir sus propiedades. La presión se logra mediante placas o mandíbulas accionadas por tornillos o un sistema hidráulico.

Los resultados de dichos ensayos, gráficas tensión-deformación, cálculos de variables estáticas como modulo de Young o límite elástico, se muestran al instante en un ordenador central que controla el ensayo a realizar.



Figura 5.2: Maquina universal de ensayos

Se utilizó una máquina universal de ensayos de la marca INSTRON, cuyo modelo es el 8802, con una capacidad de carga máxima de 250 kN.

5.2.1.2. CÁMARA DE ENSAYOS O CÁMARA OSCURA

Su función es aislar la cámara IR de las radiaciones exteriores que no sean propias de la probeta de ensayo. Este dispositivo fue diseñado teniendo en cuenta requerimientos de distancias focales de la cámara IR. Las dimensiones de esta cámara oscura son: 1 m de largo, 236 mm de alto y 176 mm de ancho.



Figura 5.3: Cámara de ensayos o cámara oscura

Además de la disposición de dicha cámara oscura, se necesita de una tela lo más oscura posible para cubrir el espacio existente entre la cámara de medición infrarroja y la propia cámara oscura. Así se consigue evitar la intrusión de radiaciones provenientes del exterior, que lo que hacen es interferir en el sistema cámara de medición-maquina de ensayos.

5.2.1.3. CONTROL DE TEMPERATURA

Se trata de un controlador P.I.D. (Proporcional Integral Derivativo), que se utiliza para la calibración de la cámara. Dicho controlador, permite fijar la temperatura de referencia (Set Point) en el valor deseado. La función de dicho controlador de temperatura se explica en el apartado 5.3.3, que trata del método de calibración de la cámara IR.

A continuación, se detalla una imagen del controlador P.I.D.:



Figura 5.4: Controlador P.I.D.

5.2.1.4. CÁMARA INFRARROJA

Se trata de una de las cámaras infrarrojas más avanzadas, comercial y tecnológicamente hablando, del mundo: SC6000. El sistema ha sido desarrollado por FLIR Systems Indigo Operations.



Figura 5.5: Cámara infrarroja SC6000

Características Técnicas

SC6000 es una cámara capaz de captar una importante cantidad de imágenes independientes entre sí, que se relaciona con multitud de PC's usando las últimas redes de interfaz existentes, incluyendo Gigabit Ethernet y Camera Link. Además, tiene una elevadísima velocidad de captación de frames (imágenes que capta la cámara que son, a su vez, independientes entre sí), de 50 Megapíxeles por segundo, la cual soporta 126 frames por segundo para una ventana de 640x512, o 420 frames por segundo para una ventana de 320x256 FPAs. El significado de FPAs viene a ser: matriz de puntos planos, es decir, el número de cuentas (Counts) o ND (número digital) que existen en dicha matriz o ventana.

El modelo SC6000 posee un detector tipo MWIR (Mid-Wavelength Infrared Sensor). Se trata de un detector fabricado con un material InSb, indio y antimonio, diseñado específicamente para captar longitudes de onda entre 1 y 5,7 μm .

Presenta 4 módulos, relacionados directamente entre ellos: SC6000, RDac, RView y RCal. A continuación, se presenta cada uno de ellos.

Módulo 1: SC6000

En dicho módulo se pueden realizar las siguientes operaciones: elección de los parámetros de captación de la cámara: la velocidad o frecuencia de frames, el tiempo de integración, el tamaño de ventana y la procedencia de la señal de adquisición de datos, entre otros.

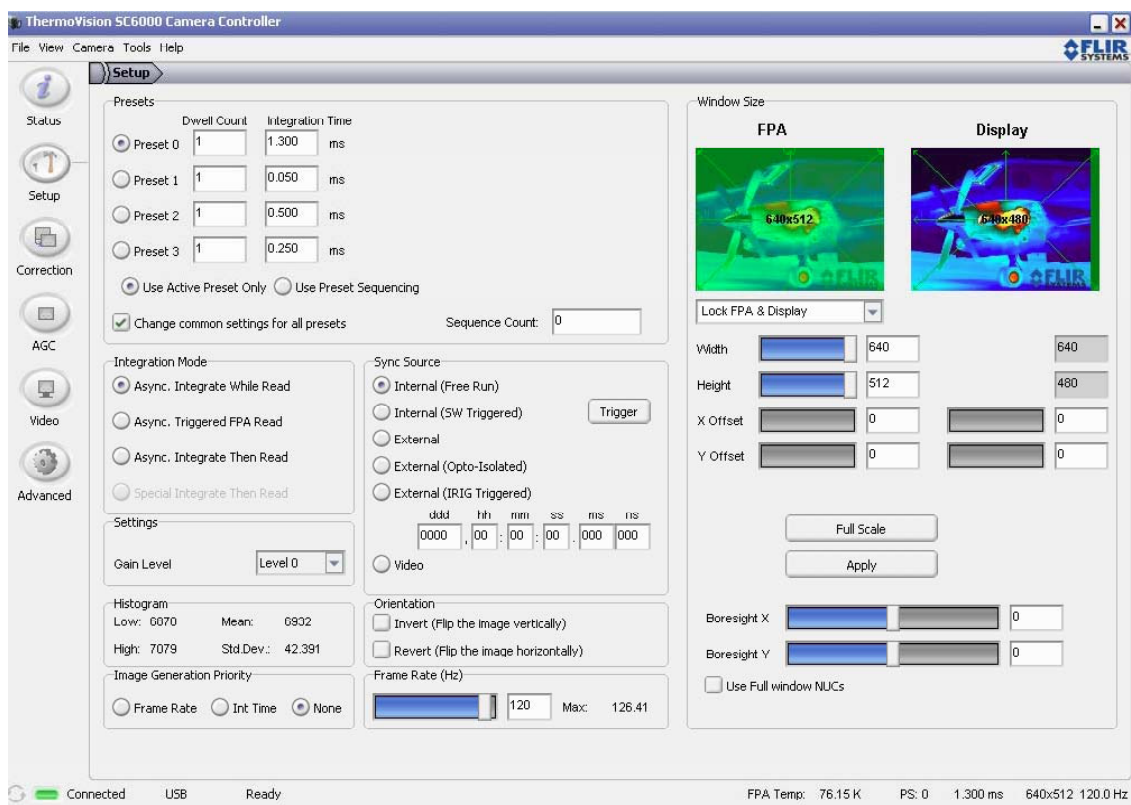


Figura 5.6: Interfaz de Controlador de la Cámara SC6000

El tiempo de integración es el periodo de tiempo existente en cada uno de los frames adquiridos por la cámara. En cuanto a la frecuencia de frames, se trata de la velocidad con la que la cámara capta dichas frames a lo largo del periodo de adquisición de datos que se le da a la cámara en el modulo RDac.

El parámetro frecuencia o velocidad de frames (**Frame Rate**) está limitado por el tiempo de lectura o por el retardo entre el comienzo de la integración y el comienzo de la adquisición de datos.

Al estar **limitado por el tiempo de lectura o readout**, la frecuencia es dependiente del tamaño de ventana, siendo la máxima frecuencia de 126 Hz para una ventana de 640 x 512.

La frecuencia o Frame Rate al estar limitada por dicho **retardo** se expresa de la siguiente manera:

$$framerate \leq \frac{1}{integration\ time + 78\mu seg}$$

Siendo el retardo 78 microsegundos.

Módulo 2: RDac

Es el módulo de captación de imágenes del sistema FLIR. El interfaz principal del módulo es el siguiente:

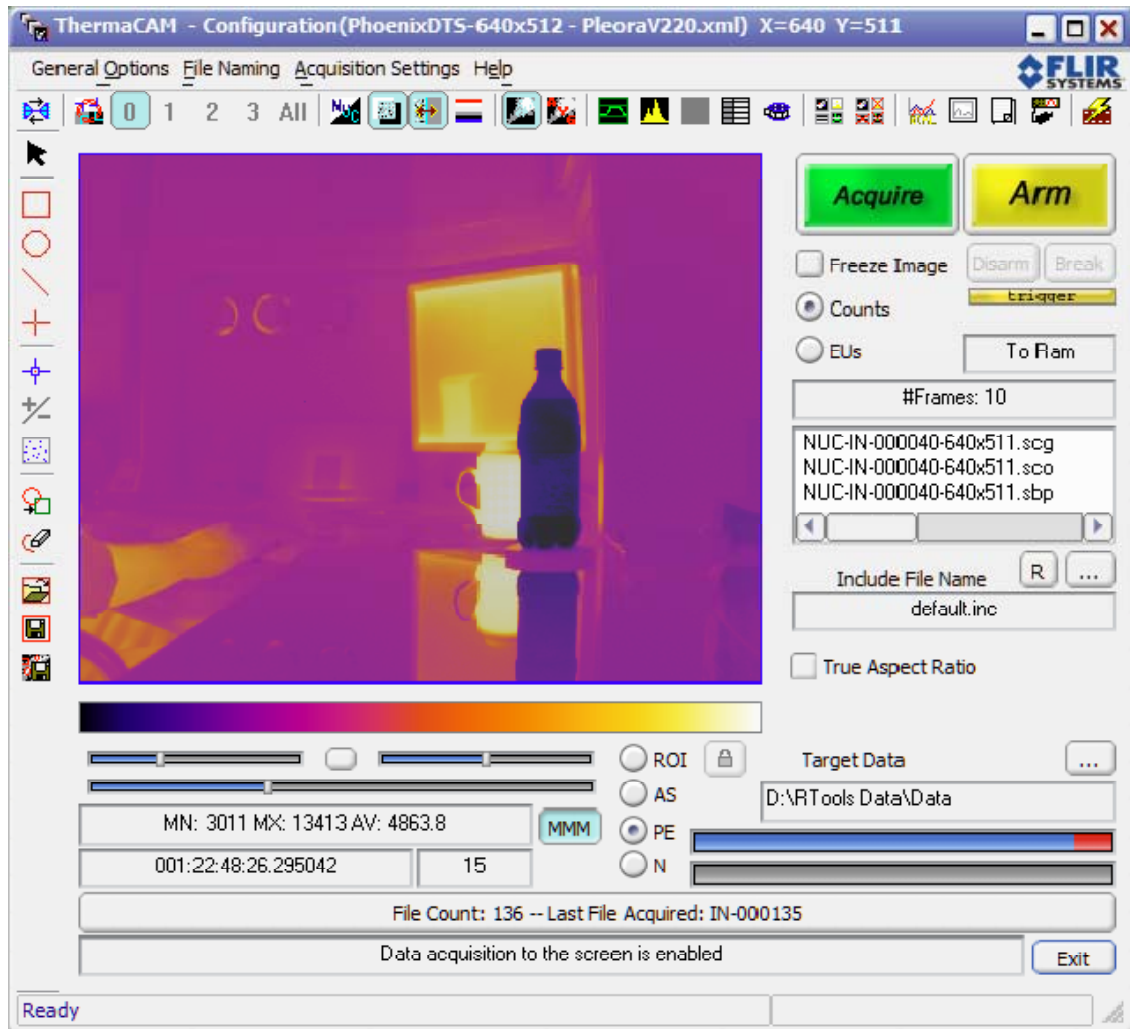


Figura 5.7: Interfaz módulo RDac

Las principales aplicaciones que presenta son: adquisición de datos, corrección de píxeles (NUC), además de diferentes opciones como: imagen y almacenamiento de datos.

En cuanto a **adquisición y almacenamiento de datos**, el modulo presenta varias opciones como determinar el tiempo de adquisición, el lugar donde salvar dichos datos o el máximo número de frames deseado. A continuación se detalla el menú en el cual es posible modificar dichos parámetros de adquisición:

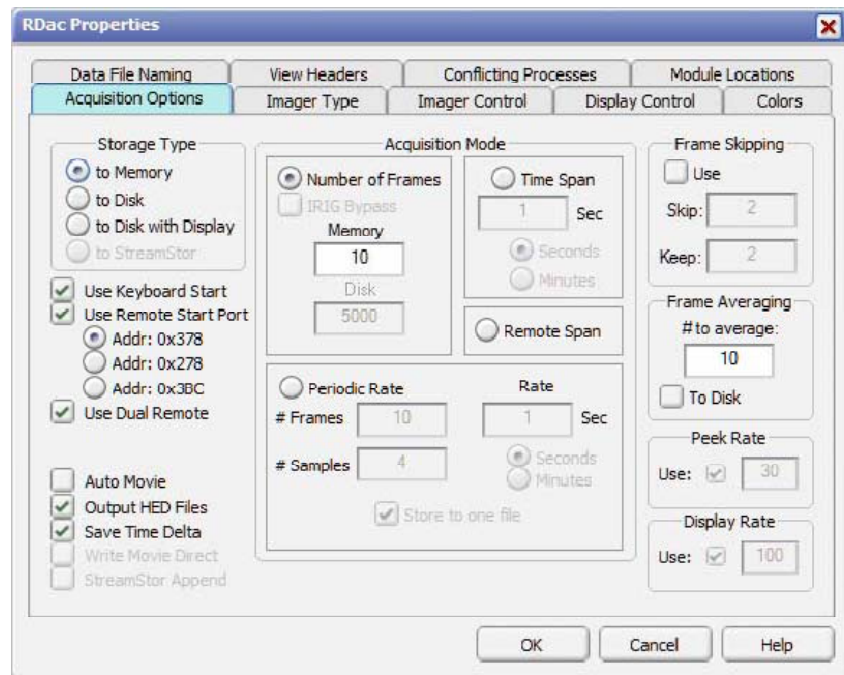


Figura 5.8: Menú de opciones de adquisición y almacenamiento de datos

Una de las funciones más importantes que se desarrolla en este módulo es la posibilidad de crear **ROI's**, esto es, Regiones de Interés (**Region Of Interest**, en inglés). Con la creación de estos ROI's el propio modulo ignora los valores de temperatura existentes en los alrededores de dicho ROI, al posicionarse sobre estos.

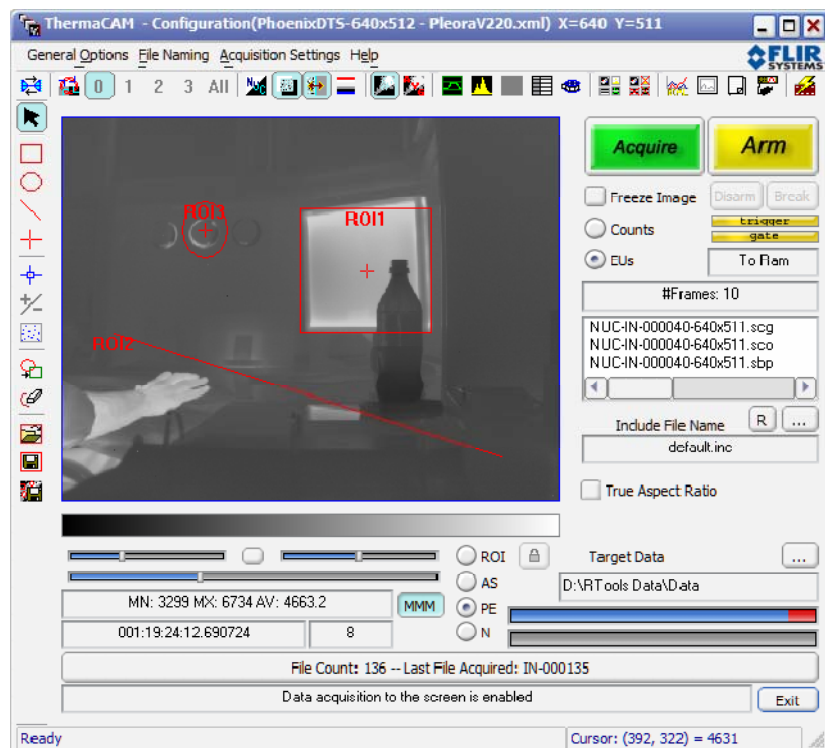


Figura 5.9: Disposición de 3 ROI's en una adquisición de datos.

Al igual que en el módulo RView, se podrá conocer los diferentes valores de temperatura, área, radiación y posición del ROI en una tabla de características facilitada por ambos módulos. A continuación, se muestra un ejemplo:

Statistic [units]	Image	ROI1 C1	ROI2 C2
Mean [counts]	4985.24	6366.49	4811.75
Sum [counts]	1.6304e+009	2.1073e+006	1.1122e+008
Std. Dev. [counts]	1024.38	2815	133.919
Center [counts]	(319.5, 255.0) 5574.0	(303.0, 201.5) 4798.5	(266.5, 343.0) 4799.5
Maximum [counts]	(460, 336) 13805.0	(453, 310) 13183.0	(181, 386) 6009.0
Minimum [counts]	(147, 264) 4253.0	(251, 164) 4693.0	(298, 398) 4583.0
Top Left	(0, 0)	(138, 82)	(76, 280)
Bottom Right	(639, 510)	(468, 321)	(357, 406)
Width [pixels]	640	331	182
Height [pixels]	511	240	127
Number of Pixels	327040	331	23114
Length [cm]	N/A	20.7	N/A
ROI Area [cm ²]	840.653	0.850832	59.4143
Intensity [N/A]	N/A	N/A	N/A
Mean Temp (Planck) [N/A]	N/A	N/A	N/A
Mean Temp (Curve Fit) [N/A]	N/A	N/A	N/A
Mean Temp (Lookup) [N/A]	N/A	N/A	N/A
Emissivity	1	1	1
U Slant Range [cm]	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/>

Buttons: Pause, Dump, Image, Sub

Figura 5.10: Tabla de las características de un ROI en tiempo real

Los valores de temperatura (“Mean Temp (Planck)”) se conocerán una vez realizada la calibración de la cámara en el módulo RCal (véase apartado 5.3.3).

Por último, en este modulo se puede también realizar una **corrección de pixeles** de forma automática o manual:

- De forma **automática**, la propia cámara proporciona un material rugoso, que hace las funciones de cuerpo negro, en forma de placa cuadrada. Primero se coloca dicha placa entre la cámara y el objeto a adquirir. Después, aparece un mensaje en la pantalla de adquirir o abortar, en función del deseo de continuar o abortar la operación de corregir los pixeles más defectuosos:



Figura 5.11: Ventanas de corrección de “Bad Pixels”.

A continuación, se muestra una imagen que compara una imagen sin aplicar dicha corrección y otra corregida:

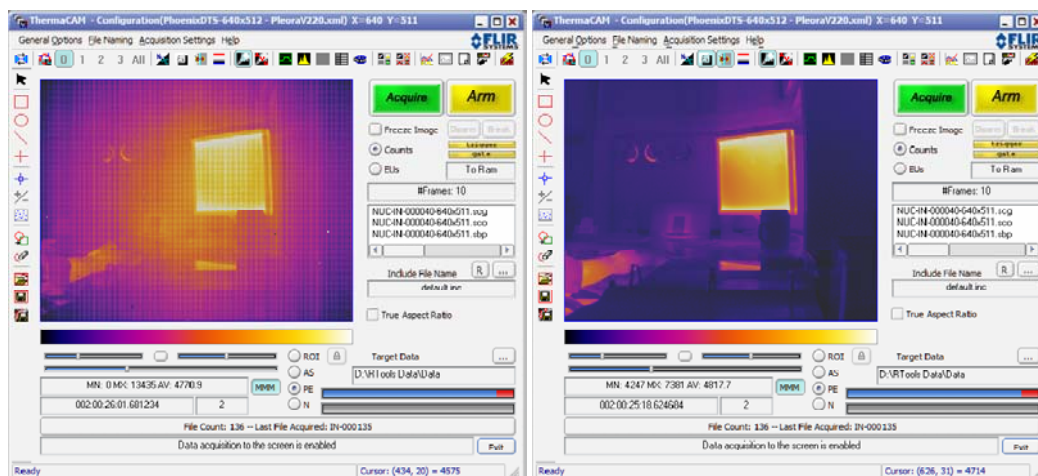


Figura 5.12: Comparación entre dos imágenes (corregida y sin corregir)

- Además, también existe la posibilidad de corregir **manualmente** dichos pixeles defectuosos, mediante los cursores del menú de la izquierda del modulo, se pueden eliminar uno a uno dichos “Bad Pixels”:

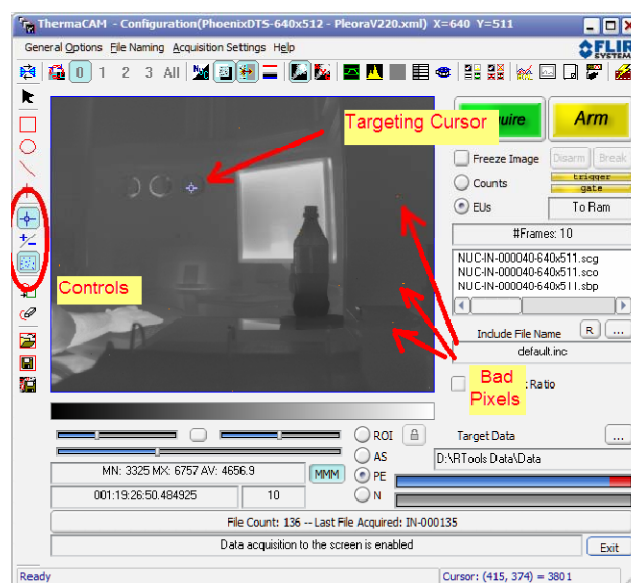


Figura 5.13: Corrección manual de “Bad Pixels”

Módulo 3: RView

El tercer módulo de FLIR es el de visualización y organización de datos. Estos datos son el resultado de realizar la captación de las imágenes (RDac) y de la transformación de los valores de dichas imágenes (ND, o número digital) en valores reales de temperatura y radiación (RCal). El interfaz de usuario de RView es el siguiente:

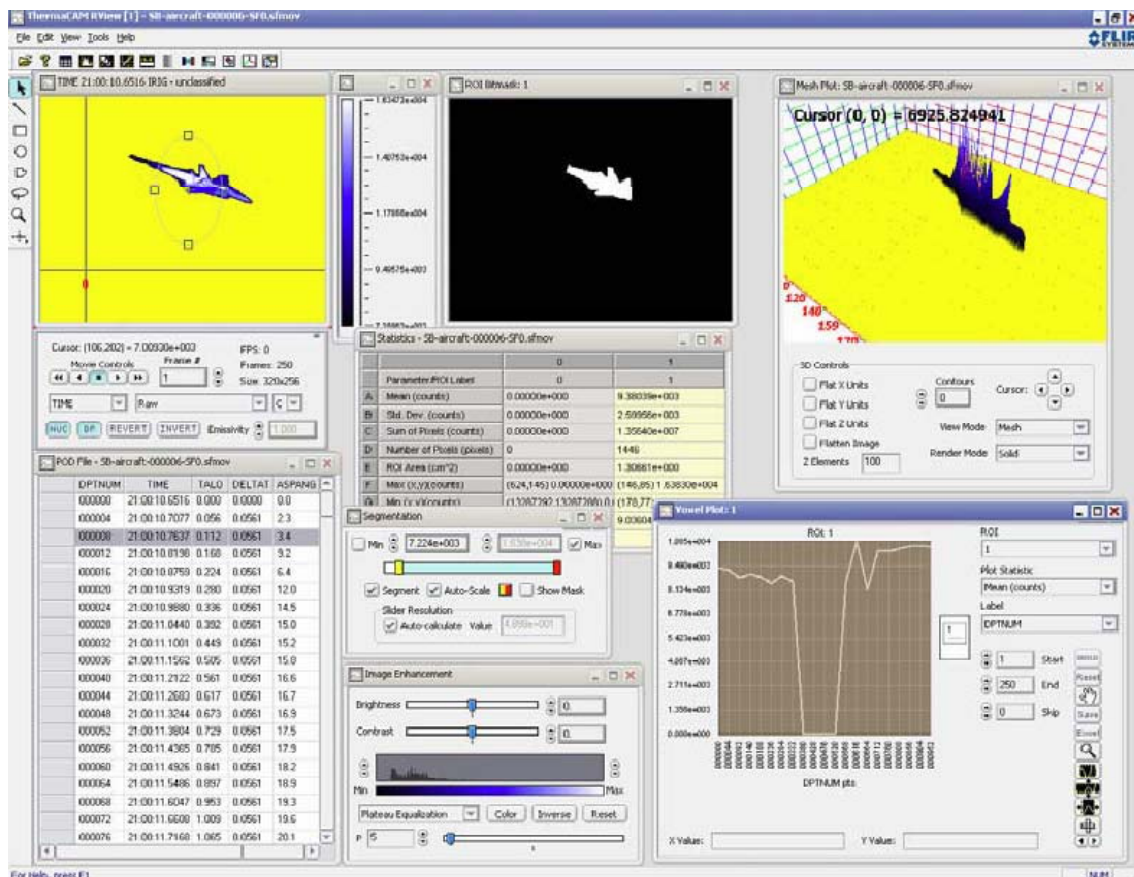


Figura 5.14: Interfaz del módulo RView

Las principales aplicaciones de dicho módulo son: **realización de gráficos**, visualización de las imágenes adquiridas en forma de **video o “frame by frame”**, **tabla de características** de nuestro ROI seleccionado (al igual que ocurre con RDac) y posibilidad de realizar nuevos ROI's, además de poder **relacionar características** de más de un ROI.

Los **gráficos más característicos** de este modulo, aplicados a los ROI's previamente seleccionados por el usuario, son los siguientes: ***Voxel Plot Interface*** (se trata de un grafico que relaciona la evolución del valor de los números digitales, ND, o de la radiación alcanzada durante la grabación en función del tiempo o del numero de frames), ***Line Profile Interface*** (grafico que relaciona la evolución de la radiación existente en función de la longitud de una línea previamente seleccionada) y ***Thick Profile Interface*** (grafico que relaciona la evolución del valor de la radiación de un ROI, pero con la única diferencia con respecto a *Line Profile Interface*, que lo hace evaluando dichos valores de columna en columna o de fila en fila, según se requiera). Los dos últimos son ideales para cálculos en los que la Región de Interés sea insignificante con respecto a los valores que la rodean.

Voxel Plot

Esta aplicación es la utilizada para analizar variaciones de radiación (o temperatura) en un intervalo de tiempo determinado, como se puede apreciar en la siguiente figura:

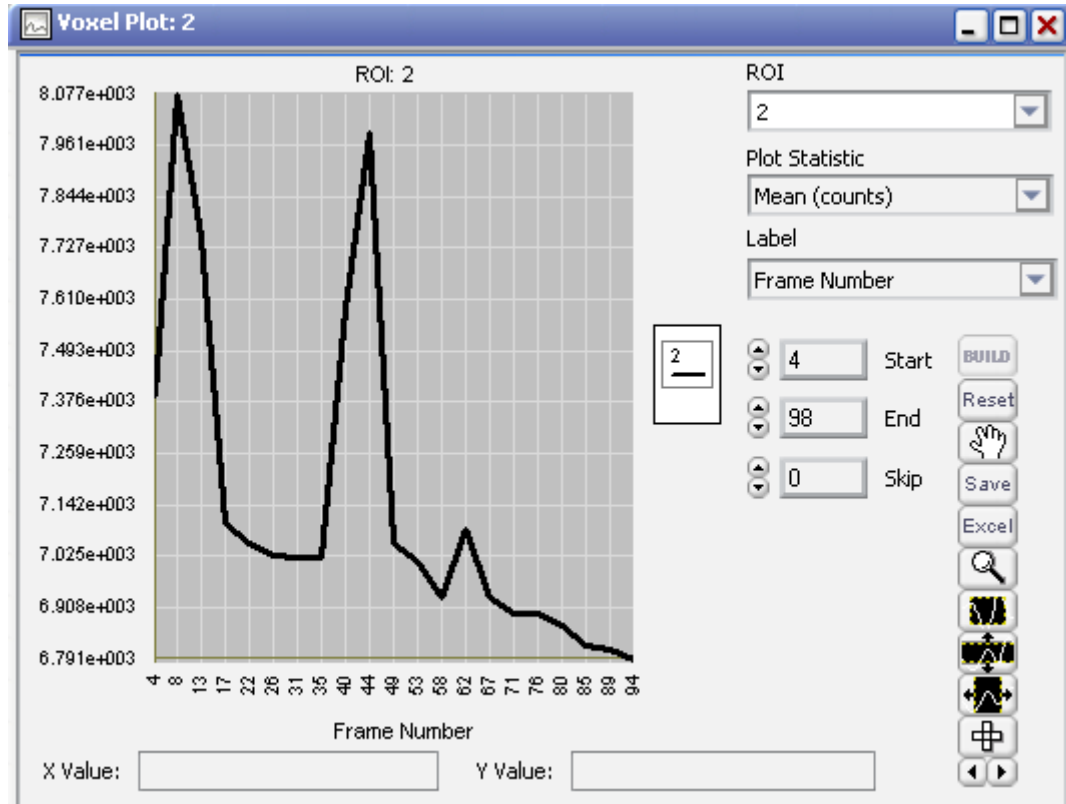


Figura 5.15: Aplicación Grafico Voxel Plot entre valores de ND y el número de frames

Line Profile Interface

Se utiliza para analizar variaciones de radiación (o temperatura) a lo largo de una longitud seleccionada previamente. Es muy útil para elementos de medición muy concretos:

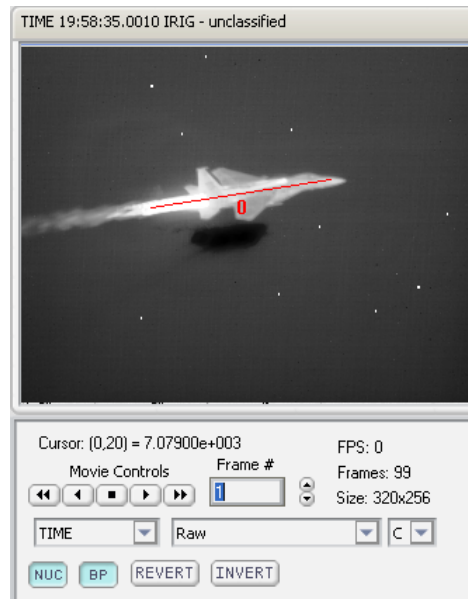


Figura 5.16: Selección de un ROI lineal en una imagen

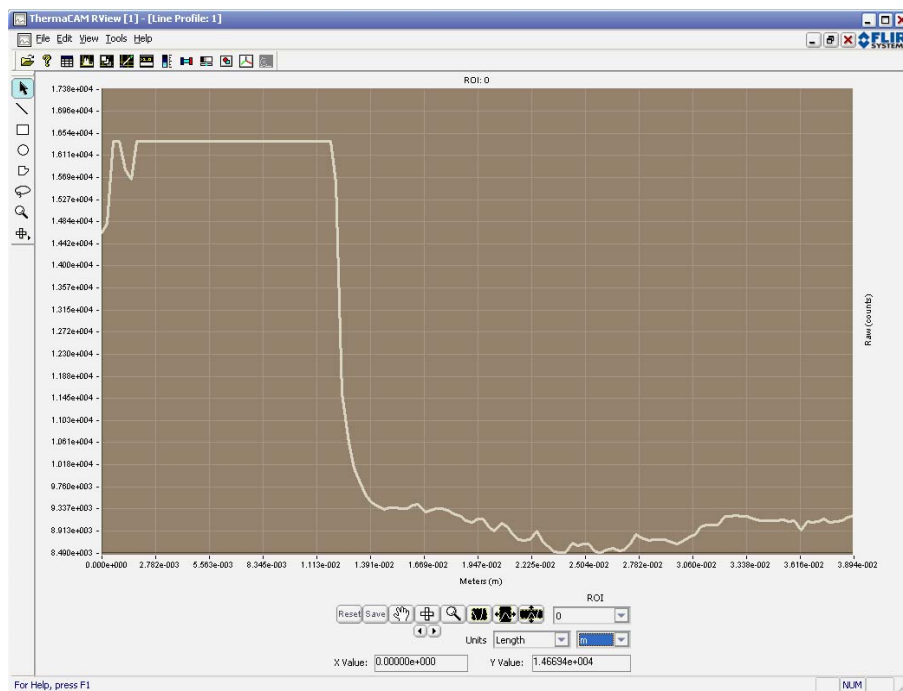


Figura 5.17: Aplicación Grafico Line Profile

Como se puede apreciar en las anteriores imágenes, dicho grafico es método muy válido para medir y analizar saltos o variaciones de temperatura a lo largo de una longitud.

Thick Profile Interface

Es similar a Line Profile, pero trabaja con todo tipo de ROIs y tiene diferentes métodos de operación. Su principal función es la de calcular estadísticamente ROIs de forma horizontal o vertical. Es decir, cogiendo columnas de izquierda a derecha o cogiendo filas de arriba abajo.

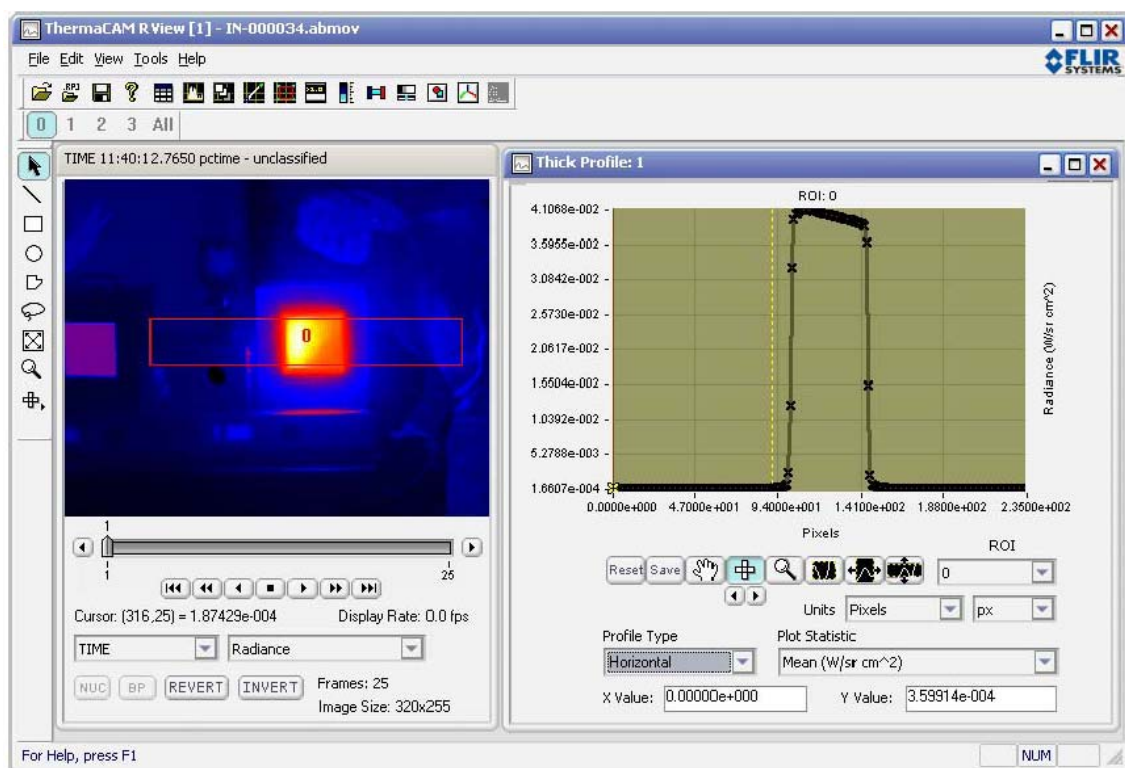


Figura 5.18: Aplicación Grafico Thick Profile

Se trata de un grafico muy útil para analizar variaciones de temperatura o de radiancia a lo largo de una superficie a estudiar, puesto que con el grafico *Line Profile* dicho análisis se limita a una recta en forma de ROI.

Otra de las principales aplicaciones de RView es la utilización del **video** o “**frame by frame**”:

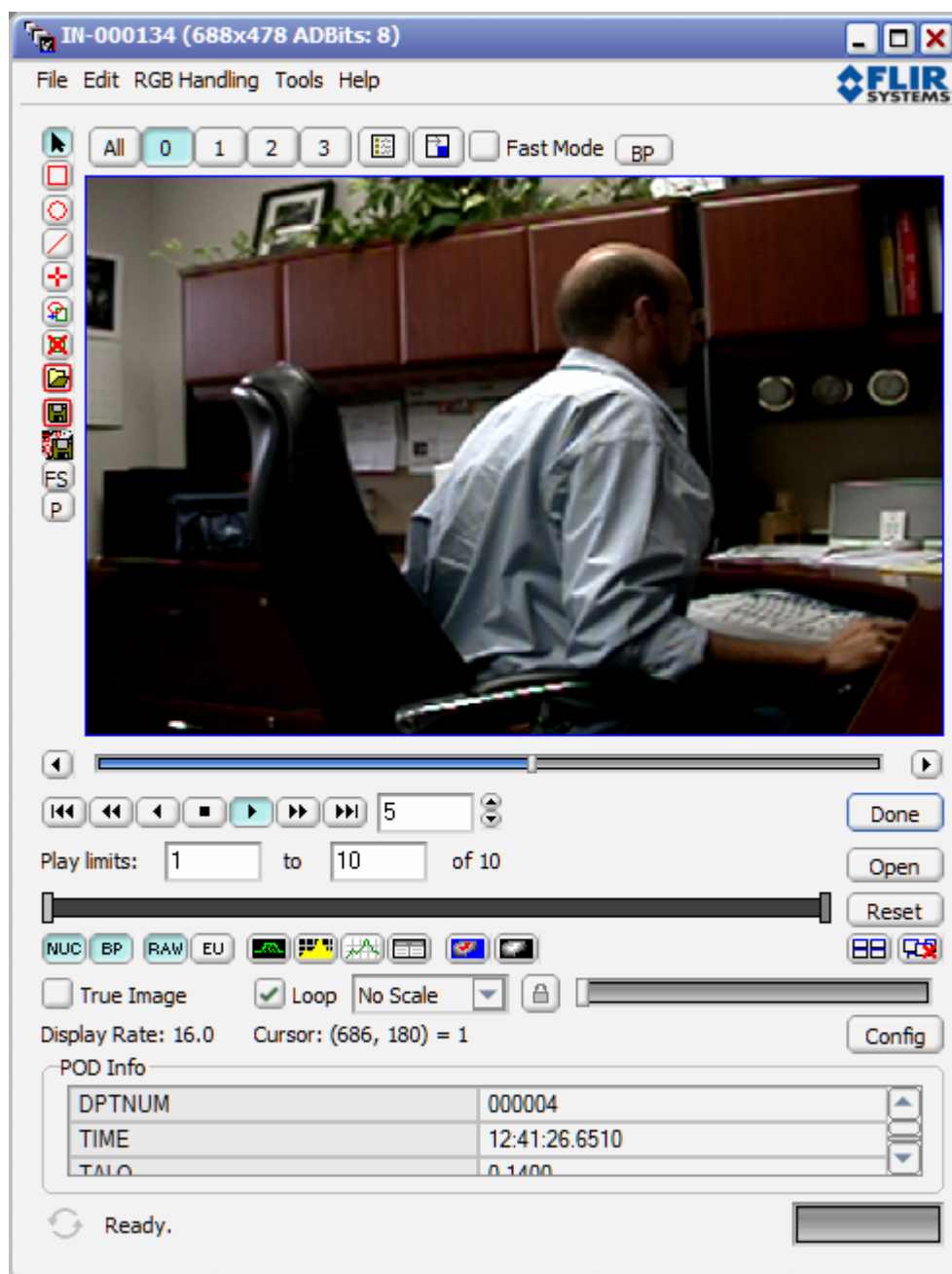


Figura 5.19: Barra de herramientas de video o frame by frame.

Por último, existe una herramienta que permite **relacionar**, mediante gráficos, **características de diferentes ROI's**. Dicha herramienta se llama **Radiometric Calculator**:

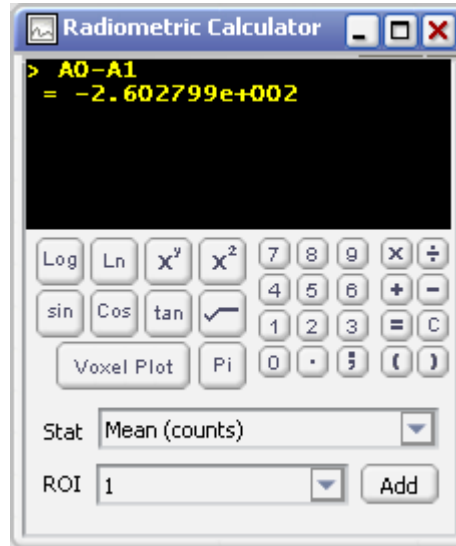


Figura 5.20: Radiometric Calculator

Se trata, además de una calculadora científica, de una aplicación de Voxel Plot. Las variables que se pueden relacionar son todas las que aparecen en la tabla de características de un ROI, es decir, el área, el valor medio de ND, la posición, las temperaturas, etc.

Módulo 4: RCal

El cuarto, y ultimo, modulo de FLIR es el de cálculo y calibración de la cámara IR. La calibración de la cámara es un aspecto muy importante en el desarrollo de la captación y visualización de los resultados. El interfaz de usuario de dicho modulo es el siguiente:

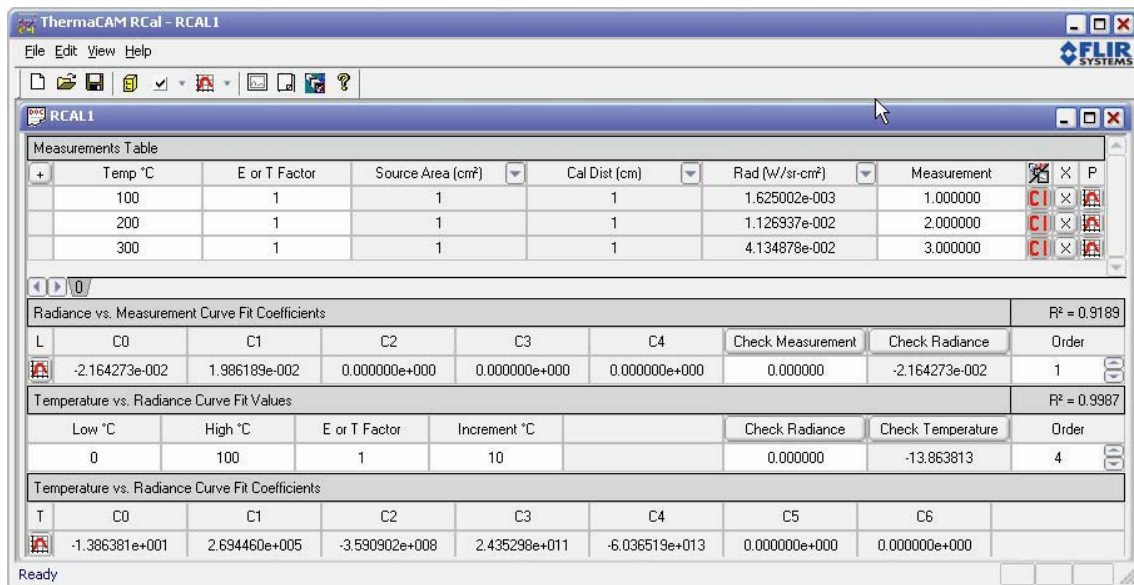


Figura 5.21: Interfaz de usuario de RCal

El modulo presenta las siguientes aplicaciones: elección de unidades, posibilidad de modificación de valores estadísticos de la Ley de Planck.

En la **elección de unidades** intervienen los siguientes factores: el área de la fuente emisora de radiación, la distancia de calibración y la medición a realizar (radiancia o irradiancia).

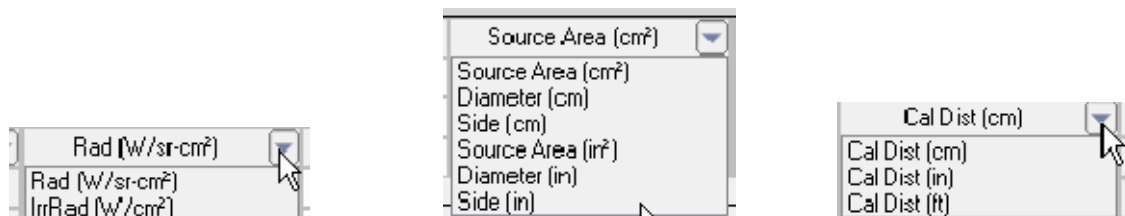


Figura 5.22: Elección de unidades

En cuanto a la posibilidad de modificar los valores estadísticos de la Ley de Planck, seguida para conocer el valor de la radiancia emitida para una determinada temperatura, se accede en el módulo RCal mediante la siguiente pestaña:

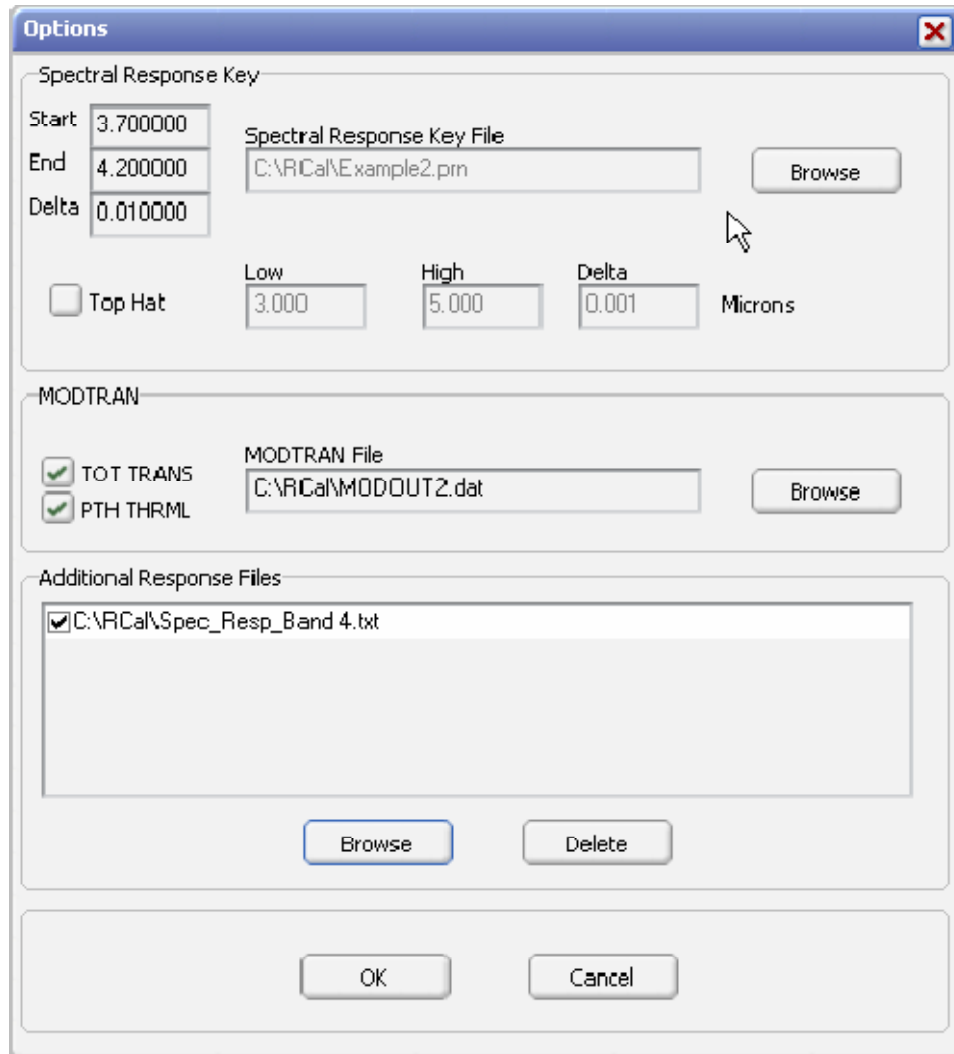


Figura 5.23: Modificación de valores de la ecuación de Planck.

En dicha pestaña se puede modificar el valor de las longitudes de onda entre las que está integrada la función de Planck, que es utilizada para hallar el valor de la radiancia:

$$L_{CÁMARA} = \varepsilon_{CÁMARA} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T) \cdot d\lambda$$

5.2.2. PROCEDIMIENTO DE ENSAYOS

Los ensayos cuasi-estáticos o a baja velocidad de deformación se han realizado en la máquina universal de ensayos, descrita en el apartado 5.2.1.1. El primer paso es el de alinear la cámara de ensayos con la máquina universal. A continuación, se instala la cámara IR en una posición óptima para la grabación del ensayo, esto se consigue con el preciso manejo del trípode de la propia cámara. En la siguiente figura, se puede observar la disposición exacta de todos los dispositivos:



Figura 5.24: Disposición de los dispositivos

La probeta se coloca en los platos de la máquina universal. Durante el ensayo se registra la gráfica fuerza (kN) vs desplazamiento (mm) y simultáneamente la cámara IR captura imágenes en un espacio temporal tal que supere el intervalo de tiempo del ensayo, para así conseguir el mayor número de imágenes posibles. Posteriormente se da lugar a la interpretación de resultados por parte de la cámara y de la máquina de ensayos, procediéndose a calcular las siguientes gráficas: tensión-deformación e incremento térmico-deformación.

5.2.3. FACTORES QUE AFECTAN AL PROCESO

En la realización de los ensayos, hay que tener en cuenta cuatro factores decisivos: dos que están relacionados con el material, que son sus propiedades y sus dimensiones iniciales, uno que tiene en cuenta las características del ensayo mecánico y, por último, otro que está relacionado con la propia cámara IR, su calibración.

5.2.3.1. CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL

En la realización de los diferentes ensayos del presente documento se han utilizado dos materiales: el AA-2024-T3 y el AW 5754. A continuación, se detallan las propiedades mecánicas, eléctricas y térmicas del material, AW 5754. También, se detallan los componentes que forman dicha aleación metálica.

Propiedades mecánicas

Propiedades	Medidas
Densidad	2.680 kg/m ³
Dureza (Brinell)	55
Límite elástico - σ_{lim}	97,4 MPa
Módulo elástico - E	69 GPa
Módulo de rigidez - G	25,9 GPa
Resistencia a tracción	215 MPa
Coefficiente de Poisson	0,33
Esfuerzo cortante - τ	140 MPa

Tabla 5.1: Propiedades mecánicas del material AW 5754

Propiedades eléctricas y térmicas

Propiedades	Medidas
Resistencia eléctrica (ρ)	5,3 $\mu\Omega\cdot\text{cm}$
Coefficiente de expansión térmica lineal (α)	23,7 $\cdot 10^{-6}$ ($^{\circ}\text{K}^{-1}$)
Calor específico (C_p)	897 J/ (kg·K)
Conductividad térmica (k)	132 W/m·K
Punto de fusión	
Temperatura liquidus	645 $^{\circ}\text{C}$
Temperatura solidus	595 $^{\circ}\text{C}$

Tabla 5.2: Propiedades eléctricas y térmicas del material AW 5754

Estas propiedades del material son necesarias para, posteriormente, realizar el cálculo teórico de la variación de temperatura provocado en el material debido al ensayo mecánico, previamente descrito.

Otra propiedad muy importante, detallada en el capítulo 3, es la constante termoelástica:

$$K_0 = \frac{\alpha}{\rho \cdot C_p} = \frac{23.7 \cdot 10^{-6} (K^{-1})}{2.68 \cdot 10^3 \left(\frac{m^3}{kg} \right) \cdot 874 \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)} = 9.86 \cdot 10^{-12} \left[\frac{1}{J \cdot m^3} \right]$$

Componentes de la aleación AW 5754

Material	Proporción
Aluminio (Al)	94.35 % - 95.35 %
Magnesio (Mg)	2.6 % - 3.6 %
Manganeso (Mn)	0.5 %
Hierro (Fe)	0.4 %
Silicio (Si)	0.4 %
Cromo (Cr)	0.3 %
Zinc (Zn)	0.2 %
Titanio (Ti)	0.15 %
Cobre (Cu)	0.1 %

Tabla 5.3: Componentes de la aleación AW 5754.

Seguidamente, se procede a detallar las propiedades del material AA-2024-T3, es decir tanto sus propiedades mecánicas como térmicas y eléctricas:

Propiedades mecánicas

Propiedades	Medidas	Observaciones
Dureza (Brinell)	120	
Dureza (Knoop)	150	
Dureza (Rockwell A)	46,8	
Dureza (Rockwell B)	75	
Dureza (Vickers)	137	
Tension máxima (σ_{\max})	483 MPa	
Limite elastico (σ_{\lim})	345 MPa	
Densidad	2,78 g/cm ³	
Deformacion a rotura	18%	A partir de 1,59 mm de espesor
Resistencia a tracción	379 MPa	A partir de muestras de 2,5 de ancho x 0,16 cm de espesor
Coefficiente de Poisson	0,33	
Tension de fatiga	138 MPa	A partir de 500.000.000 ciclos
Maleabilidad	70%	
Módulo de rigidez (G)	28 GPa	
Esfuerzo cortante (τ)	283 MPa	

Tabla 5.4: Propiedades mecánicas de la aleación AA 2024-T3.

Propiedades eléctricas y térmicas

Propiedades	Medidas	Observaciones
Resistencia eléctrica (ρ)	5,82 $\mu\Omega \cdot \text{cm}$	A partir de 20°C
Coeficiente de expansión térmica lineal (α)	23,2 $\cdot 10^{-6}$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Entre 20 y 100°C
	24,7 $\cdot 10^{-6}$ ($^{\circ}\text{C}^{-1}$)	Entre 20 y 3100°C
Calor específico (C_p)	0,875 (J/g $\cdot^{\circ}\text{C}$)	
Solidus	502 $^{\circ}\text{C}$	
Liquidus	638 $^{\circ}\text{C}$	

Tabla 5.5: Propiedades térmicas y eléctricas de la aleación AA-2024-T3.

Componentes de la aleación AW 5754

Material	Proporción
Al	90,7-94,7 %
Cr	0,10%
Cu	3,8-4,9 %
Fe	0,50%
Mg	1,2-1,8%
Mn	0,3-0,9%
Si	0,50%
Ti	0,15%
Zn	0,25%

Tabla 5.6: Componentes de la aleación AA-2024-T3.

Otra propiedad muy importante, detallada en el capítulo 3, es la constante termoelástica:

$$K_0 = \frac{\alpha}{\rho \cdot C_p} = \frac{23.2 \cdot 10^{-6} (^{\circ}C^{-1})}{2.78 \cdot 10^3 \left(\frac{kg}{m^3} \right) \cdot 875 \left(\frac{J}{kg \cdot ^{\circ}C} \right)} = 9.54 \cdot 10^{-12} \left(\frac{1}{J \cdot m^3} \right)$$

5.2.3.2. DIMENSIONES DEL MATERIAL

Las dimensiones de las probetas, expresadas en milímetros, que se han utilizado en dicho proyecto fueron las siguientes:

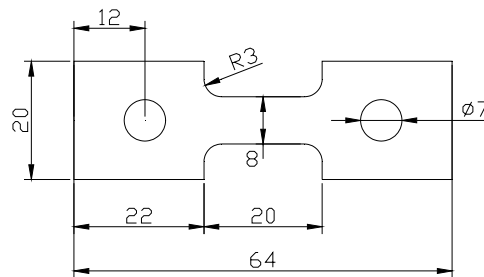


Figura 5.25: Dimensiones de las probetas de los ensayos

La existencia de cuello en el diseño de dichas probetas es muy importante, debido a que en éste se produce el mayor **defecto microestructural** en la probeta al ser sometido a tracción. Es decir, en el cuello es donde se produce la mayor deformación, tal y como se puede apreciar en la siguiente imagen:

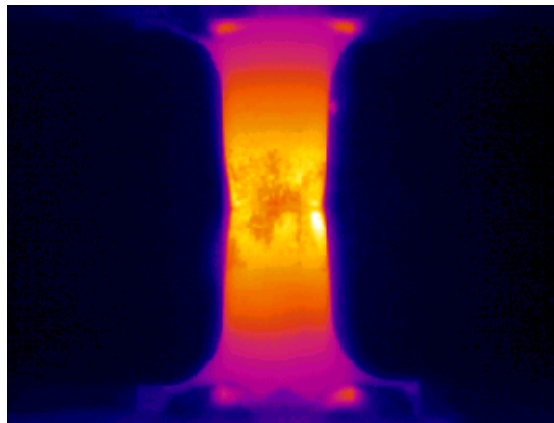


Figura 5.26: Deformación máxima en una probeta

5.2.3.3. CARACTERÍSTICAS DEL ENSAYO MECÁNICO

El ensayo mecánico presenta las siguientes condiciones:

- Se considera en todo momento un estado tensional plano, es decir, no existen tensiones a lo largo del espesor de la probeta, tensiones tangenciales. Todos los ensayos mecánicos se han realizado con tensiones longitudinales.
- Los ensayos realizados en la máquina universal son todos de tracción, no de compresión, debido a que el rango de temperaturas en el que se producen las deformaciones es pequeño comparado con las temperaturas que se alcanzan con ensayos de compresión.
- El siguiente paso es el de calcular una **velocidad de deformación** para el ensayo:

La velocidad de deformación se calcula como el cociente entre la longitud del cuello de la probeta a deformar y la inversa de la frecuencia de la máquina universal:

$$v_{def} = \frac{L}{\frac{1}{f}} = \frac{20 \text{ (mm)}}{\frac{1}{0.1 \text{ (1/s)}}} = 2 \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right) = 2 \left(\frac{\text{mm}}{\text{s}} \right) \cdot 60 \left(\frac{\text{s}}{\text{min}} \right) = 120 \left(\frac{\text{mm}}{\text{min}} \right)$$

La frecuencia de la máquina universal que se ha tomado es de 0.1 (1/s) debido a la condición de cuasi-estático del ensayo.

- El penúltimo paso es el de conocer el tiempo que tarda la máquina en deformar elásticamente la probeta, para después designarlo al **tiempo de captación** de la cámara IR:

En los ensayos realizados, cuyos resultados se pueden observar en el apartado 6.2.2, el **tiempo de deformación elástica** del material es de, aproximadamente, 2 segundos.

- El último paso es el de definir las unidades y parámetros de los ensayos:

En los ensayos tanto la tensión como la deformación son ingenieriles. Los cabezales de la máquina universal se colocan en tal posición que el único lugar donde se produce deformación longitudinal es el cuello de la propia probeta, como se puede apreciar en la siguiente figura:

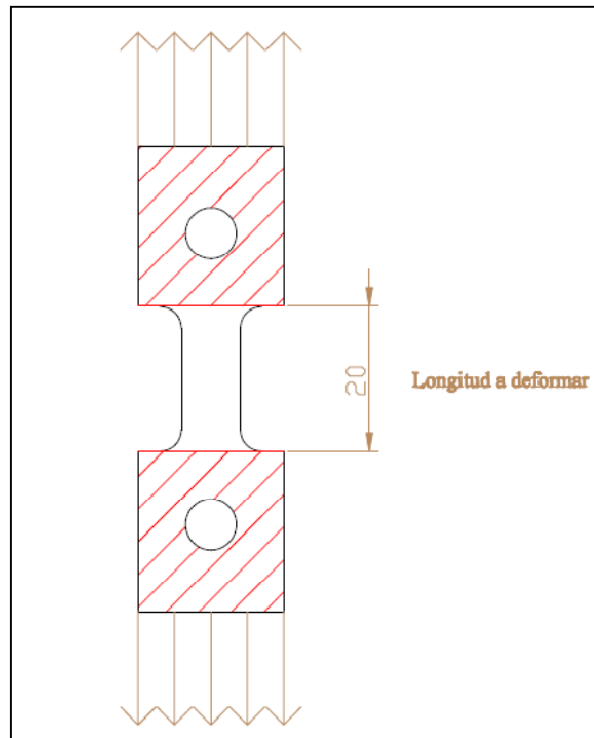


Figura 5.27: Detalle de las características de los ensayos

A continuación, se muestran las relaciones entre las **tensiones y deformaciones ingenieriles**:

$$S_i = \frac{F_i}{A_0}$$

Donde A_0 es el área transversal de la probeta, que es de 8 mm^2 .

$$e_i = \frac{L_i - L_0}{L_0}$$

Donde L_0 es el valor de la longitud inicial de la probeta, de 20 mm.

Seguidamente, se procede a desarrollar las relaciones existentes entre las variables anteriormente expuesta (variables ingenieriles), para conocer las variables verdaderas (**tensiones y deformaciones verdaderas**):

$$\sigma_i = S_i \cdot (1 + e_i)$$

$$\varepsilon_i = \ln(1 + e_i)$$

5.2.4. CALIBRACIÓN RADIOMÉTRICA DE LA CÁMARA IR

Para cuantificar la energía térmica existente entre dos estados en un proceso de deformación se han utilizado dos técnicas: **termopares de respuesta rápida** y **termografía infrarroja**.

Para la **técnica de los termopares de respuesta rápida**, se han utilizado los siguientes dispositivos: una cámara de ensayos aislada térmicamente en cuyo interior se ubica una resistencia eléctrica de 1500 W (Fuente de Alimentación), un controlador de temperatura P.I.D. (el mismo del apartado 5.2.1.3) conectado a la resistencia eléctrica del interior de la cámara de ensayos, una probeta de aluminio, una cámara oscura (véase apartado 5.2.1.2) que impida la existencia de radiaciones exteriores en el interior de la cámara de ensayos y, por último, un termopar de respuesta rápida.



a)



b)



c)



d)

Figura 5.28: a) Detalle de la cámara de ensayos; b) Conexión eléctrica entre la entrada del controlador P.I.D. y la resistencia eléctrica ubicada en el interior de la cámara de ensayos; c) y d) Detalle del termopar.

A continuación, se observan las correspondientes comparaciones entre las temperaturas tomadas por el termopar y las seleccionadas por el controlador P.I.D.:

Proceso de calentamiento:

Temperatura Fuente Alimentacion	Temperatura Termopar
20	20,3
22	23,4
24	26
26	28,6
28	30,9
30	32,9
32	34,8
34	36,7
36	38,4
38	40,5
40	42,2
42	44,4
44	47,2
46	49,7
48	51,1
50	52,8
52	55,1
54	57,4
56	59,7
58	62,1
60	63,1

Temperatura Fuente Alimentacion	Temperatura Termopar
32	32,8
34	35,6
36	38,5
38	41,1
40	43,3
42	45,8
44	47,9
46	49,8
48	51,7
50	53
52	54,9
54	57,3
56	59,3
58	61
60	62,7

Tablas 5.7 y 5.8: Proceso de calentamiento

Proceso de enfriamiento:

Temperatura Fuente Alimentacion	Temperatura Termopar
62	61,8
60	60,3
58	57,9
56	55,6
54	54
52	51,9
50	49,8
48	48
46	45,8
44	43,8
42	41,9
40	39,5
38	37,8
36	35,8
34	33,9
32	31,7

Temperatura Fuente Alimentacion	Temperatura Termopar
58	58,2
56	55,5
54	53,3
52	51,4
50	48,9
48	47,7
46	45,6
44	43,6
42	41,5
40	39,6
38	37,5
36	35,7
34	33,6
32	31,5

Tablas 5.9 y 5.10: Proceso de enfriamiento

La técnica de los termopares es, simplemente, una comprobación práctica de la regulación de la temperatura tanto por parte de la cámara como por parte de la fuente de alimentación (resistencia eléctrica).

A continuación, se explican los pasos a seguir en la **técnica de la termografía infrarroja**, para la **calibración de la cámara SC6000**:

- Obtención de **valores de radiancia en el modulo RCal** para los anteriores valores mostrados:

Primero, se muestran los valores de radiancia obtenidos al realizar dos **calentamientos** en la calibración de la cámara, a diferentes valores de emisividad:

Calentamiento 1 ($\epsilon=0,8$)	
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Radiancia (W/cm^2)
20	1,158E-04
22	1,248E-04
24	1,345E-04
26	1,447E-04
28	1,556E-04
30	1,672E-04
32	1,794E-04
34	1,924E-04
36	2,064E-04
38	2,207E-04
40	2,361E-04
42	2,523E-04
44	2,695E-04
46	2,876E-04
48	3,067E-04
50	3,268E-04
52	3,480E-04
54	3,703E-04
56	3,937E-04
58	4,171E-04
60	4,405E-04

Calentamiento 2 ($\epsilon=0,9$)	
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Radiancia (W/cm^2)
32	2,198E-04
34	2,357E-04
36	2,525E-04
38	2,704E-04
40	2,892E-04
42	3,091E-04
44	3,301E-04
46	3,523E-04
48	3,757E-04
50	4,004E-04
52	4,263E-04
54	4,536E-04
56	4,823E-04
58	4,125E-04
60	5,442E-04

Tablas 5.11 y 5.12: Valores de radiancia para los dos procesos de calentamiento

Finalmente, se muestran los valores obtenidos en RCal al realizarse los dos enfriamientos para la calibración de la cámara infrarroja:

Enfriamiento 1 ($\epsilon=0,9$)	
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Radiancia (W/cm^2)
62	5,303E-04
60	4,998E-04
58	4,707E-04
56	4,429E-04
54	4,166E-04
52	3,915E-04
50	3,677E-04
48	3,450E-04
46	3,236E-04
44	3,023E-04
42	2,839E-04
40	2,656E-04
38	2,483E-04
36	2,319E-04
34	2,164E-04
32	2,018E-04

Enfriamiento 2 ($\epsilon=0,9$)	
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Radiancia (W/cm^2)
58	4,707E-04
56	4,429E-04
54	4,166E-04
52	3,915E-04
50	3,677E-04
48	3,450E-04
46	3,236E-04
44	3,023E-04
42	2,839E-04
40	2,656E-04
38	2,483E-04
36	2,319E-04
34	2,164E-04
32	2,018E-04

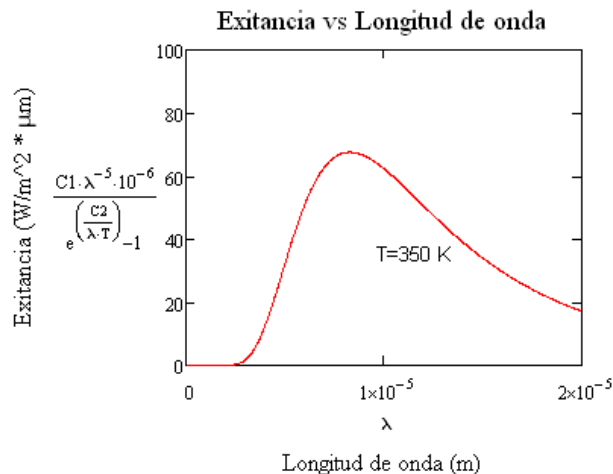
Tablas 5.13 y 5.14: Valores de radiancia para los dos procesos de enfriamiento

- **Comprobación teórico-práctica** de la Ley de Planck y de la Ley de desplazamiento de Wien.

Con el programa matemático Mathcad, se han calculado e interpretado las distribuciones de radiación espectral de Planck para valores de temperatura de 100, 200, 300 y 350 K, pues son los valores más utilizados en el presente proyecto.

En el eje de coordenadas “Y” están situados los valores de exitancia de la Ley de Planck, con las constantes con unidades del S.I., se pueden observar en el punto 4.2, y en el eje de coordenadas “X” los valores de la longitud de onda, también con unidades del S. I. Para conseguir las unidades de exitancia $M [W/m^2 \cdot \mu m]$ es necesario multiplicar por 10^{-6} el numerador de la Ley de Planck.

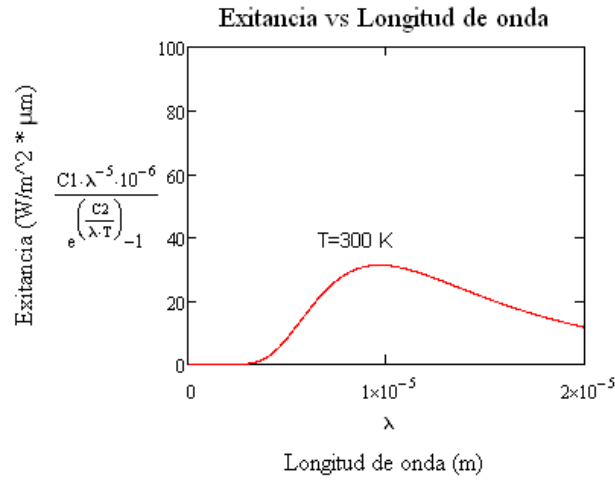
A continuación se muestra la grafica de distribución de Planck para **$T = 350 K$** :



El punto en el cual se alcanza la máxima exitancia para una temperatura de 350 K es el siguiente:

$$\lambda_{max} = \frac{2898[K \cdot \mu m]}{350[K]} = 8.28 \mu m = 8.28 \cdot 10^{-6} m$$

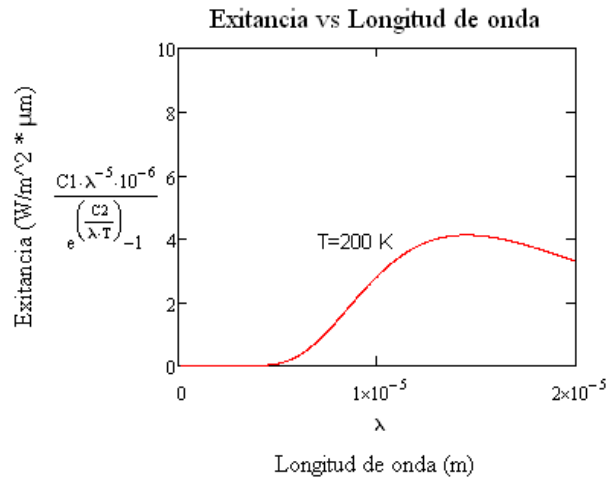
$T = 300\text{ K} :$



El punto en el cual se alcanza la máxima exitancia para una temperatura de 300 K es el siguiente:

$$\lambda_{max} = \frac{2898[K \cdot \mu m]}{300[K]} = 9.66 \mu m = 9.66 \cdot 10^{-6} m$$

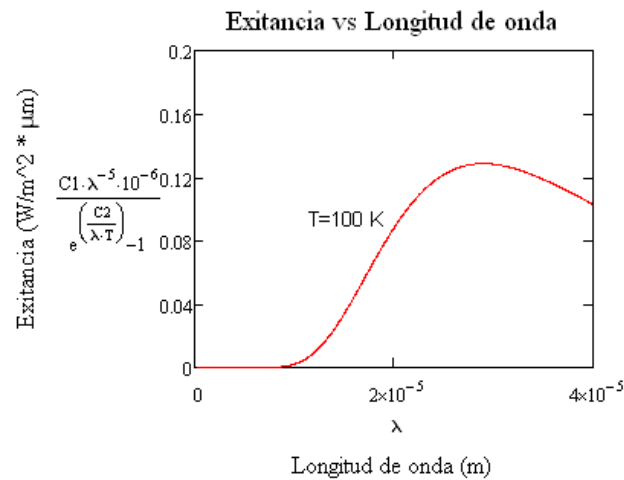
$T = 200\text{ K} :$



El punto en el cual se alcanza la máxima exitancia para una temperatura de 200 K es el siguiente:

$$\lambda_{max} = \frac{2898[K \cdot \mu m]}{200[K]} = 14.99 \mu m = 1.499 \cdot 10^{-5} m$$

$T = 100 \text{ K} :$



El punto en el cual se alcanza la máxima exitancia para una temperatura de 100 K es el siguiente:

$$\lambda_{max} = \frac{2898[K \cdot \mu m]}{100[K]} = 28.98 \mu m = 2.898 \cdot 10^{-5} m$$

Para dar por concluida dicha comprobación teórico-práctica de la Ley de Planck, así como la Ley de desplazamiento de Wien, se proporciona, de nuevo, la distribución espectral de radiación de Planck:

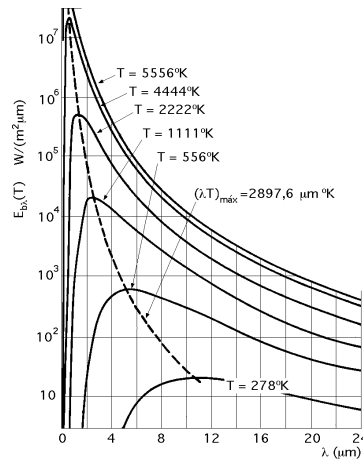


Figura 5.29: Grafica de la distribución espectral de radiación de Planck y desplazamiento de Wien.

Para finalizar dicha comprobación teórico-práctica, se adjunta una gráfica de la evolución de la longitud de onda máxima (según la Ley de desplazamiento de Wien) en función de la temperatura:

Temperatura (K)	λ (m)
350	8,280E-06
300	9,660E-06
200	1,499E-05
100	2,898E-05

Tabla 5.15: Comprobación teórico-práctica de la Ley de Wien

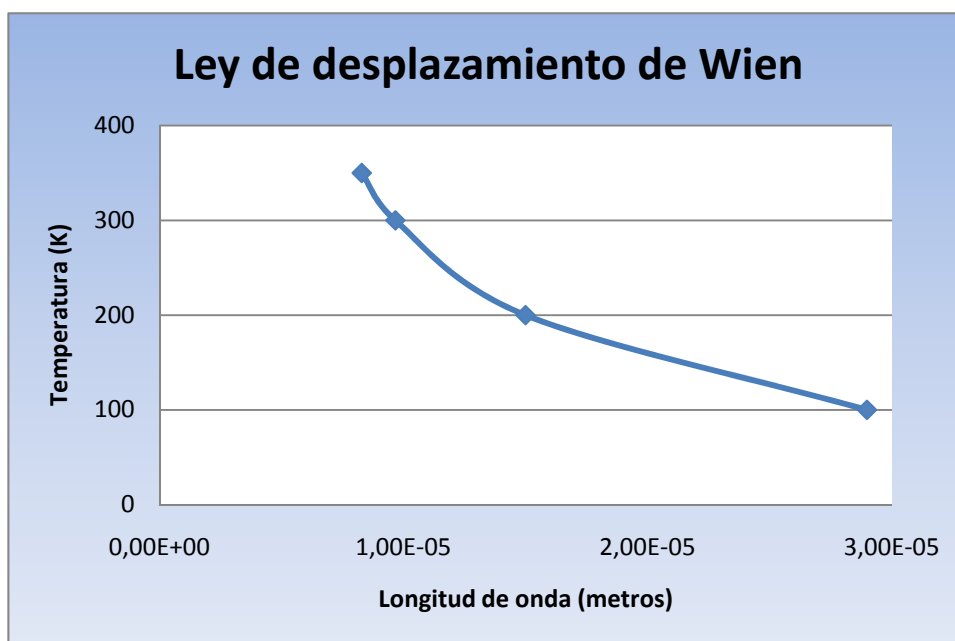


Figura 5.30: Grafica de la comprobación teórico-práctica del desplazamiento de Wien.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

6.1. INTRODUCCIÓN

A continuación se muestran los resultados tanto teóricos como prácticos, conocidos estos últimos a través de la realización de los ensayos mecánicos.

La metodología de los resultados prácticos es la siguiente:

- Primero se han realizado tres diferentes ensayos del material AW 5754, con sus correspondientes condiciones de contorno, para, posteriormente conocer la ley tensión-deformación.
- Después, se ha realizado un ensayo con la cámara IR y con el material AW 5754 captando variaciones térmicas en función de la deformación elástica.
- Para finalizar, se han realizado dos ensayos con la cámara IR y con el material AA-2024-T3, captando variaciones de temperatura.

La metodología de los resultados teóricos es la siguiente:

- A partir de las leyes tensión-deformación de los tres primeros ensayos realizados se procede a calcular teóricamente los parámetros mecánicos y térmicos del material AW 5754, para posteriormente ser analizados en el siguiente apartado del presente documento (Discusión de los resultados). Los parámetros que se calculan en dicho apartado son: ley-tensión deformación, variación de temperatura vs variación de deformación plástica y variación de temperatura vs variación de deformación elástica.
- En el ensayo con la cámara IR y con el material AW 5754 se procede a calcular la variación térmica en función de la deformación con el programa R-Tools, cuyo procedimiento viene descrito en el apartado 5.2.1.4 , es decir, en el apartado de la cámara infrarroja SC 6000.
- En los dos últimos ensayos se procede a calcular la evolución térmica del material en función de la deformación tanto elástica como plástica del AA-2024-T3.

6.2. ENSAYOS CUASI-ESTÁTICOS

Las condiciones cuasi-estáticas de los ensayos se encuentran en el apartado 5.2.5. Aunque cabe recordar que la principal condición que hace que dichos ensayos sean cuasi-estáticos es la relativamente baja velocidad de deformación.

6.2.1. RESULTADOS TEÓRICOS

En cuanto a los resultados teóricos, se calcula primero uno de los parámetros más importantes para conocer la variación de temperatura en un estado tensional, β :

$$\beta = (3\lambda + 2G) \cdot \alpha$$

Falta conocer en la anterior expresión los valores de λ y de G :

$$\lambda = \frac{\nu \cdot E}{(1 + \nu) \cdot (1 - 2\nu)} = \frac{0.33 \cdot 69 \text{ (GPa)}}{(1 + 0.33) \cdot (1 - 2 \cdot 0.33)} = 0.73 \cdot 69 \text{ (GPa)} = 50.37 \text{ (GPa)}$$

$$G = \mu = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} = \frac{69 \text{ (GPa)}}{2 \cdot (1 + 0.33)} = 0.376 \cdot 69 \text{ (GPa)} = 25.944 \text{ (GPa)}$$

Siendo el valor de β el siguiente:

$$\begin{aligned} \beta &= (3\lambda + 2G) \cdot \alpha = [(3 \cdot 50.37) + (2 \cdot 25.944)] \text{ (GPa)} \cdot [23.7 \cdot 10^{-6}] \text{ (K}^{-1}\text{)} \\ &= 202.998 \text{ (GPa)} \cdot [23.7 \cdot 10^{-6}] \text{ (K}^{-1}\text{)} = 4.811 \cdot 10^{-3} \left(\frac{\text{GPa}}{\text{K}} \right) \end{aligned}$$

En los siguientes apartados se da a conocer el valor de β para cada uno de los valores del módulo de elasticidad (E) obtenidos.

6.2.2. RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación se muestran los resultados experimentales de los tres ensayos **sin** captación de imágenes por parte de la **cámara IR**.

- **Ensayo N°1:**

Las condiciones de contorno son las siguientes:

$$v_{def} = 2 \text{ mm/s}$$

$$\alpha_{corte} = 18^\circ$$

El estado final de la probeta en el Ensayo N°1 es:



Figura 6.1: Estado final de la probeta del ensayo n°1

A continuación se muestra la ley tensión-deformación ingenieril:

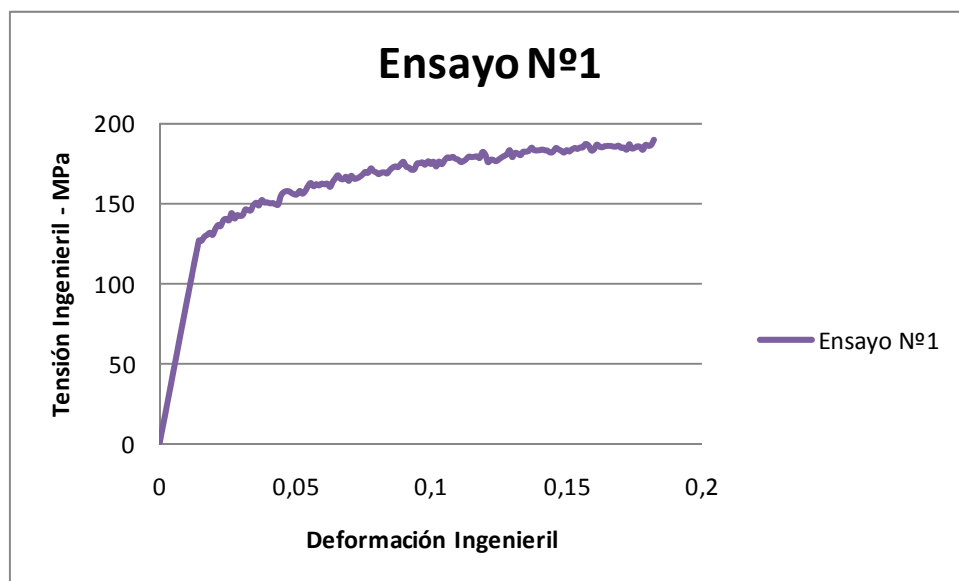


Figura 6.2: Ley tensión deformación ingenieril del ensayo n°1

Mediante la aplicación de las fórmulas del capítulo 5.2.5 (Tensiones y Deformaciones Ingenieriles y Verdaderas), se da lugar a la siguiente ley tensión-deformación verdadera:

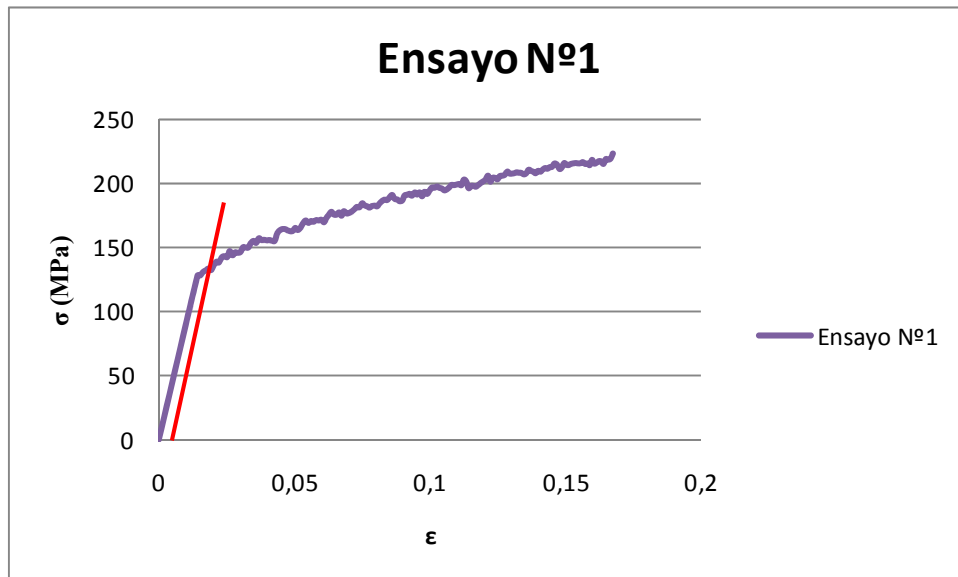


Figura 6.3: Ley tensión deformación verdadera del ensayo nº1

La línea roja de la curva tensión-deformación se trata de la paralela a la zona elástica del material para una deformación del 0,2%. Mediante dicha recta, se conoce el valor del punto límite elástico:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{142,24 \text{ [MPa]}}{0,055} = 69.000 \text{ [MPa]} = 69 \text{ [GPa]}$$

A continuación, se procede a calcular la **variación de temperatura** debido a la deformación plástica. Para conocer los valores de la deformación plástica se realiza la siguiente operación:

$$\varepsilon_i^p = \varepsilon_i - \left(\frac{\sigma_i}{E} \right)$$

En la siguiente imagen se representa la gráfica tensión-deformación plástica del ensayo N°1:

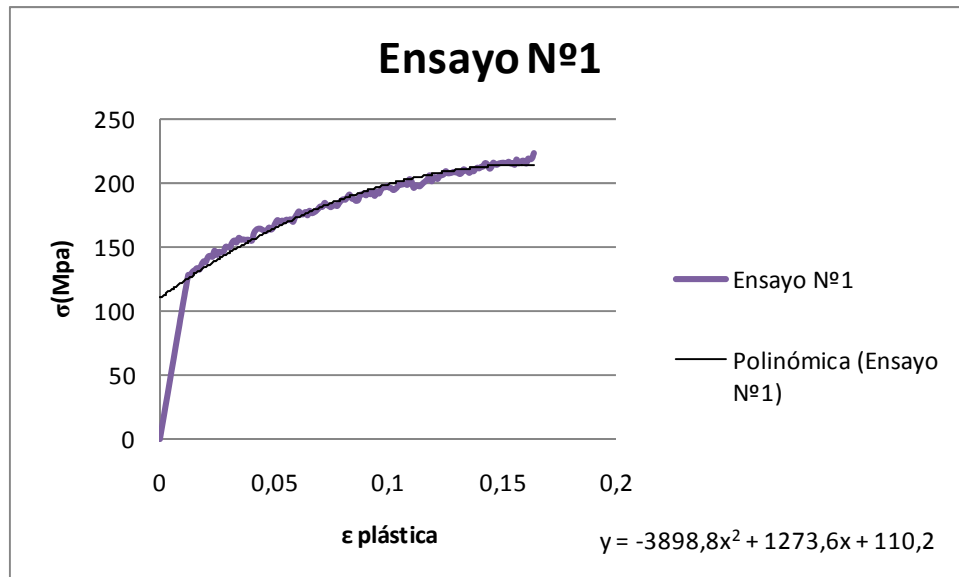


Figura 6.4: Ley tensión deformación plástica del ensayo n°1

Una vez conocida la ecuación que da forma a la curva **tensión-deformación plástica**, se calcula el valor del trabajo producido para deformar el material realizando una integral entre los valores de deformación al inicio de dicha curva y el valor de la deformación en la rotura de la probeta, o valor final de la curva de deformación plástica:

$$W_1 = \int_0^{0.164} (-3898.8x^2 + 1273.6x + 110.2)dx = 29.47 \cdot 10^6 [J]$$

Conocido dicho valor del trabajo producido en la deformación del material, se procede a calcular la variación térmica existente:

$$\Delta T_1 = \frac{W_1 \cdot \alpha}{\rho \cdot C_p} = \frac{29.47 \cdot 10^6 [J] \cdot 23.7 \cdot 10^{-6} [K^{-1}]}{2680 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 897 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]} = 2.9 \cdot 10^{-4} \cdot T_0$$

Donde T_0 es la temperatura ambiente de la probeta.

- **Ensayo N°2:**

Las condiciones de contorno son las siguientes:

$$v_{def} = 2 \text{ mm/s}$$

$$\alpha_{corte} = 18^\circ$$

El estado final de la probeta en el Ensayo N°2 es:



Figura 6.5: Estado final de la probeta del ensayo n°2

A continuación se muestra la ley tensión-deformación ingenieril:

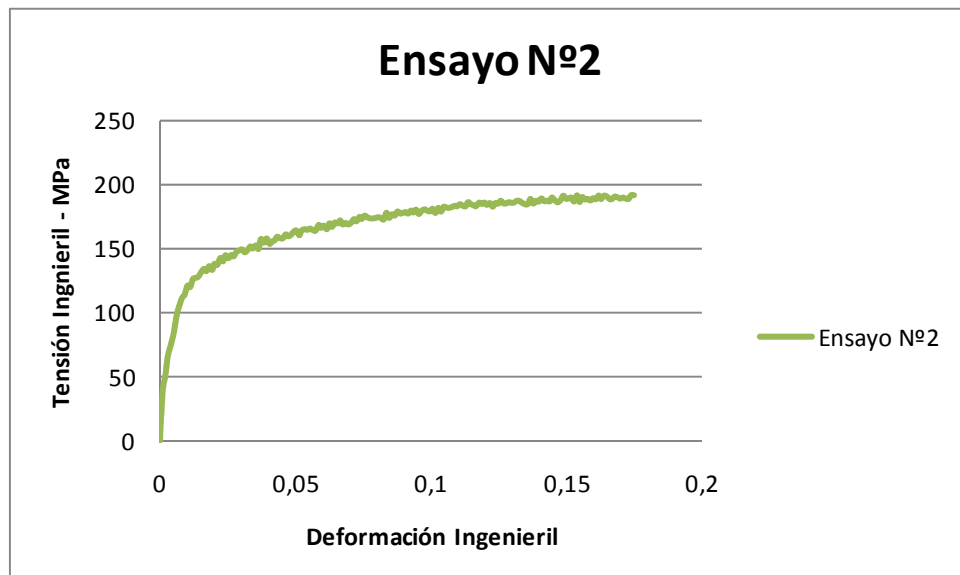


Figura 6.6: Ley tensión deformación ingenieril del ensayo n°2

Mediante la aplicación de las fórmulas del capítulo 5.2.5, se da lugar a la siguiente ley tensión-deformación verdadera:

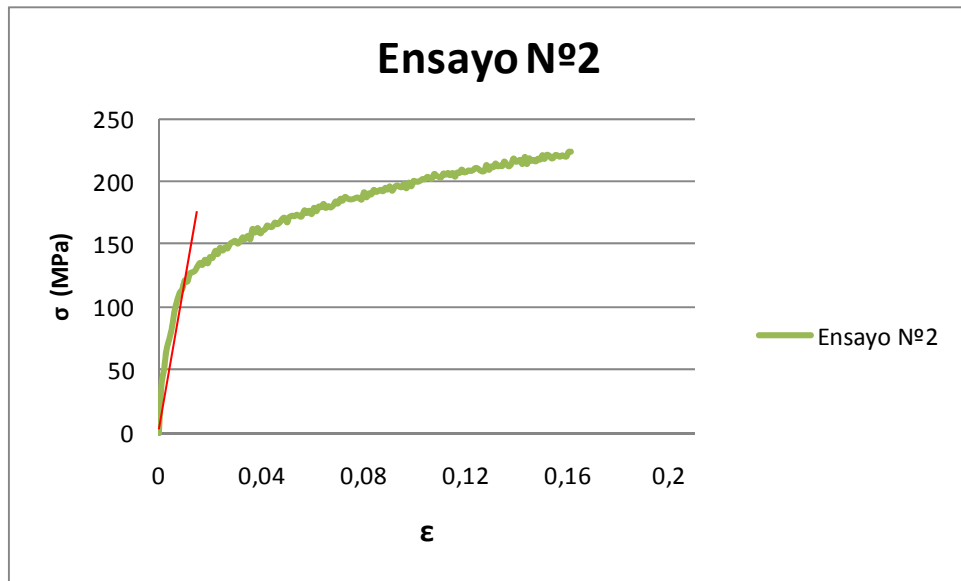


Figura 6.7: Ley tensión deformación verdadera del ensayo n°2

La línea roja de la curva tensión-deformación se trata de la paralela a la zona elástica del material para una deformación del 0,2%. Mediante dicha recta, se conoce el valor del punto límite elástico:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{138,21 [MPa]}{0,002} = 69.105 [MPa] = 69,105 [GPa]$$

A continuación, se procede a calcular la **variación de temperatura** debido a la deformación plástica. Para conocer los valores de la deformación plástica se realiza la siguiente operación:

$$\varepsilon_i^p = \varepsilon_i - \left(\frac{\sigma_i}{E} \right)$$

:

En la siguiente imagen se representa la gráfica tensión deformación plástica del Ensayo N°2:

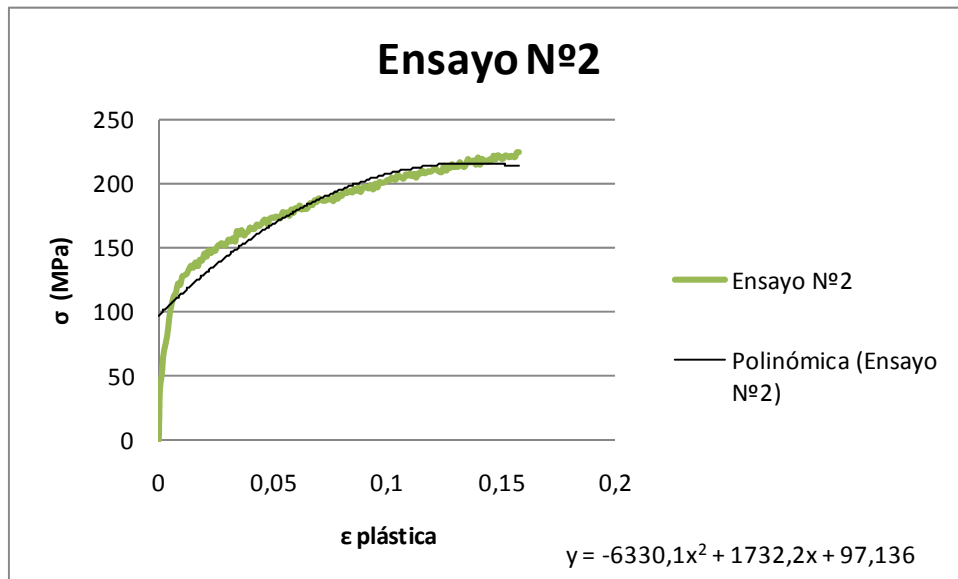


Figura 6.8: Ley tensión deformación plástica del ensayo n°2

Una vez conocida la ecuación que da forma a la curva **tensión-deformación plástica**, se calcula el valor del trabajo producido para deformar el material realizando una integral entre los valores de deformación al inicio de dicha curva y el valor de la deformación en la rotura de la probeta, o valor final de la curva de deformación plástica

$$W_2 = \int_0^{0.158} (-6330.1x^2 + 1732.2x + 97.136)dx = 28.65 \cdot 10^6 [J]$$

Conocido dicho valor del trabajo producido en la deformación del material, se procede a calcular la variación térmica existente:

$$\Delta T_2 = \frac{W_2 \cdot \alpha}{\rho \cdot c_p} = \frac{28.65 \cdot 10^6 [J] \cdot 23.7 \cdot 10^{-6} [K^{-1}]}{2680 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 897 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]} = 2.82 \cdot 10^{-4} \cdot T_0$$

Donde T_0 es la temperatura ambiente de la probeta.

- **Ensayo N°3:**

Las condiciones de contorno son las siguientes:

$$v_{def} = 0,2 \text{ mm/s}$$

$$\alpha_{corte} = 18^\circ$$

El estado final de la probeta en el Ensayo N°3 es:



Figura 6.9: Estado final de la probeta del ensayo n°3

A continuación se muestra la ley tensión-deformación ingenieril:

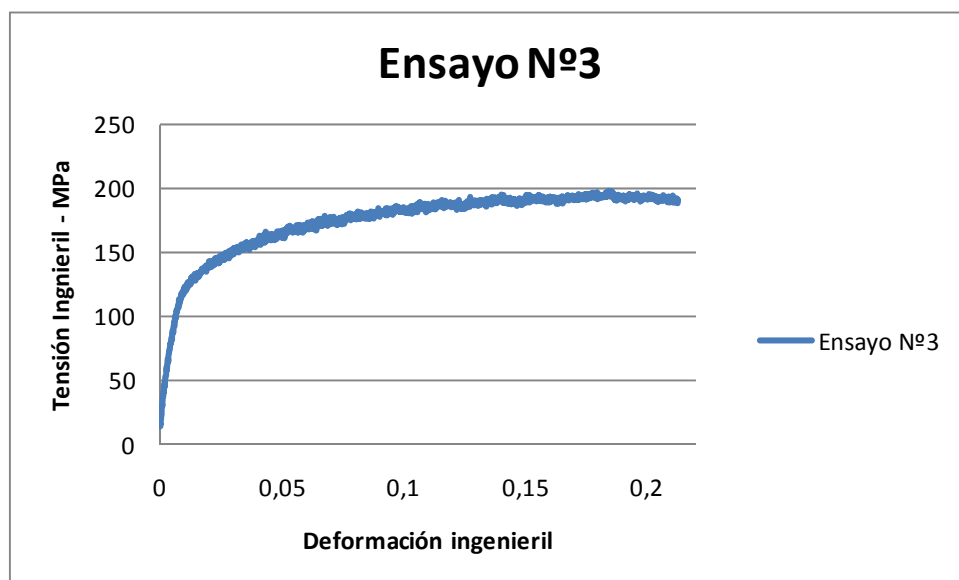


Figura 6.10: Ley tensión deformación ingenieril del ensayo n°3

Mediante la aplicación de las fórmulas del capítulo 5.2.5, se da lugar a la siguiente ley tensión-deformación verdadera:

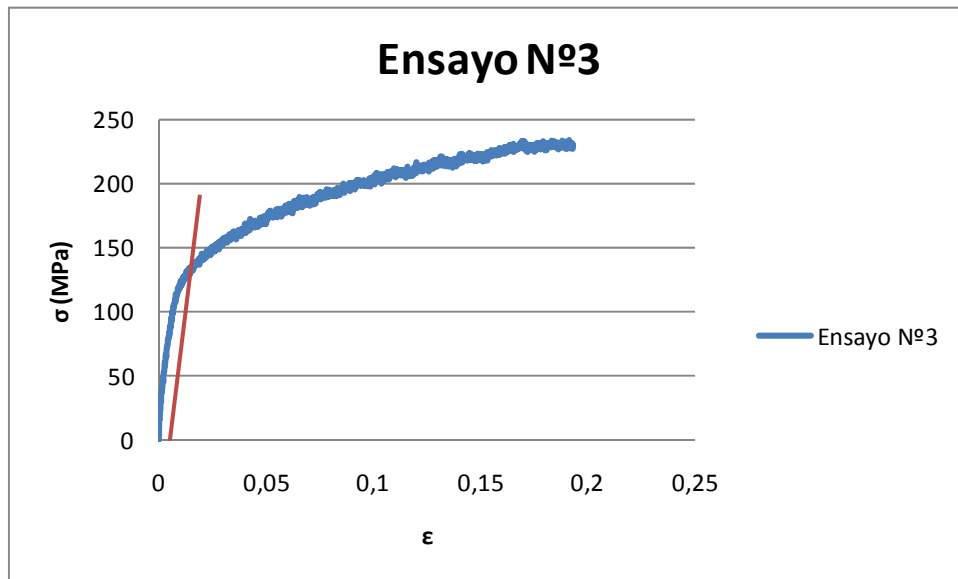


Figura 6.11: Ley tensión deformación verdadera del ensayo nº3

La línea roja de la curva tensión-deformación se trata de la paralela a la zona elástica del material para una deformación del 0,2%. Mediante dicha recta, se conoce el valor del punto límite elástico:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{138,94 \text{ [MPa]}}{0,002} = 67.848 \text{ [MPa]} = 67,85 \text{ [GPa]}$$

A continuación, se procede a calcular la **variación de temperatura** debido a la deformación plástica. Para conocer los valores de la deformación plástica se realiza la siguiente operación:

$$\varepsilon_i^p = \varepsilon_i - \left(\frac{\sigma_i}{E} \right)$$

:

En la siguiente imagen se representa la gráfica tensión deformación plástica del Ensayo N°3:

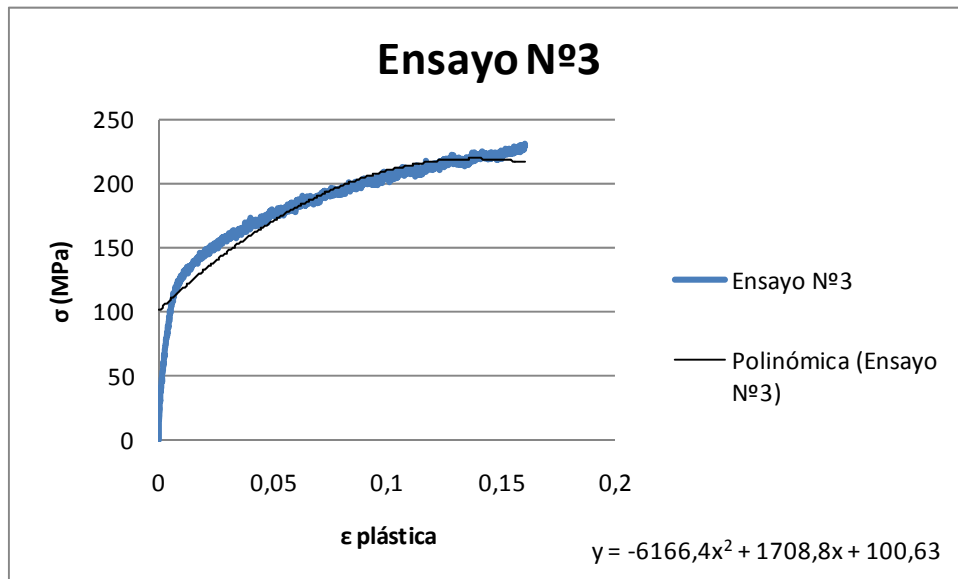


Figura 6.12: Ley tensión deformación plástica del ensayo n°3

Una vez conocida la ecuación que da forma a la curva **tensión-deformación plástica**, se calcula el valor del trabajo producido para deformar el material realizando una integral entre los valores de deformación al inicio de dicha curva y el valor de la deformación en la rotura de la probeta, o valor final de la curva de deformación plástica

$$W_3 = \int_0^{0.159} (-6166.4x^2 + 1708.8x + 100.63)dx = 29.32 \cdot 10^6 [J]$$

Conocido dicho valor del trabajo producido en la deformación del material, se procede a calcular la variación térmica existente:

$$\Delta T_3 = \frac{W_3 \cdot \alpha}{\rho \cdot C_p} = \frac{29.32 \cdot 10^6 [J] \cdot 23.7 \cdot 10^{-6} [K^{-1}]}{2680 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \cdot 897 \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]} = 2.89 \cdot 10^{-4} \cdot T_0$$

Donde T_0 es la temperatura ambiente de la probeta.

- A continuación, se muestran los resultados del ensayo realizado con la cámara IR y con el material AW 5754:

Se ha realizado una gráfica que relaciona la variación térmica en función del tiempo de adquisición de datos por parte de la cámara:

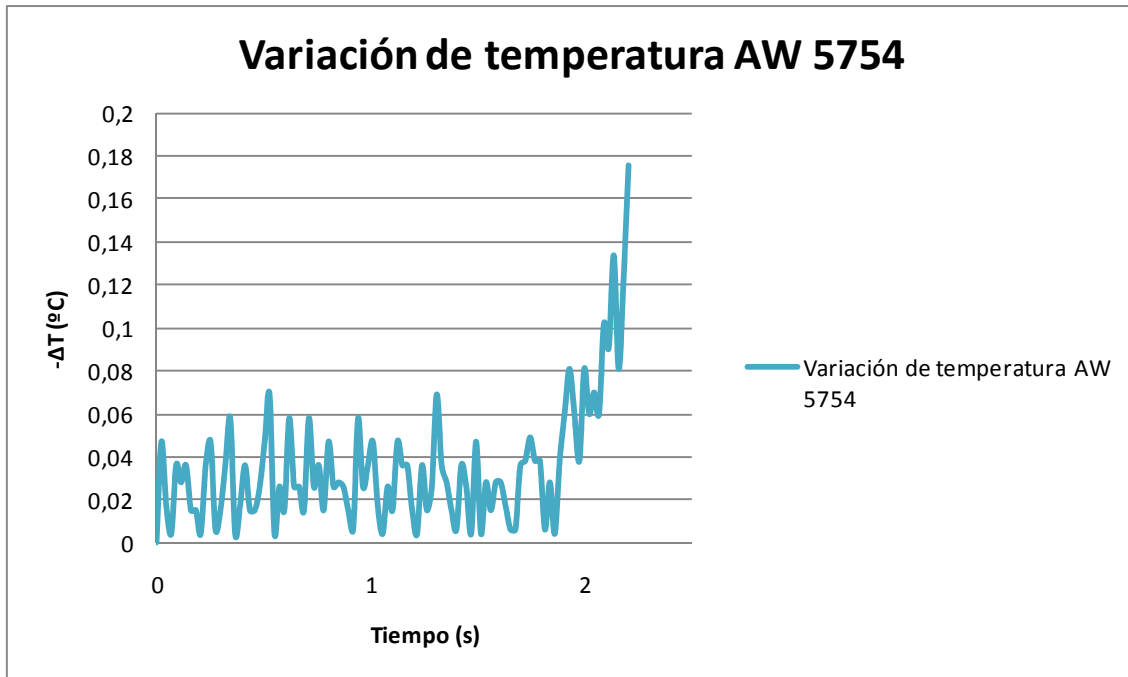


Figura 6.13: Variación de temperatura vs tiempo AW 5754

Como se puede comprobar, el efecto termoelástico ocurre en la primera zona hasta que han transcurrido 1.75 segundos, más tarde la variación de temperatura es la ocasionada por la deformación plástica. El valor de mayor variación térmica debido a deformación plástica, se analiza en el apartado 8 de dicho documento, es decir, en la discusión de los resultados.

A continuación se dispone de una figura en la que se observa la variación de temperatura en el punto central de la probeta, durante todo el proceso de deformación, tanto elástica como plástica:

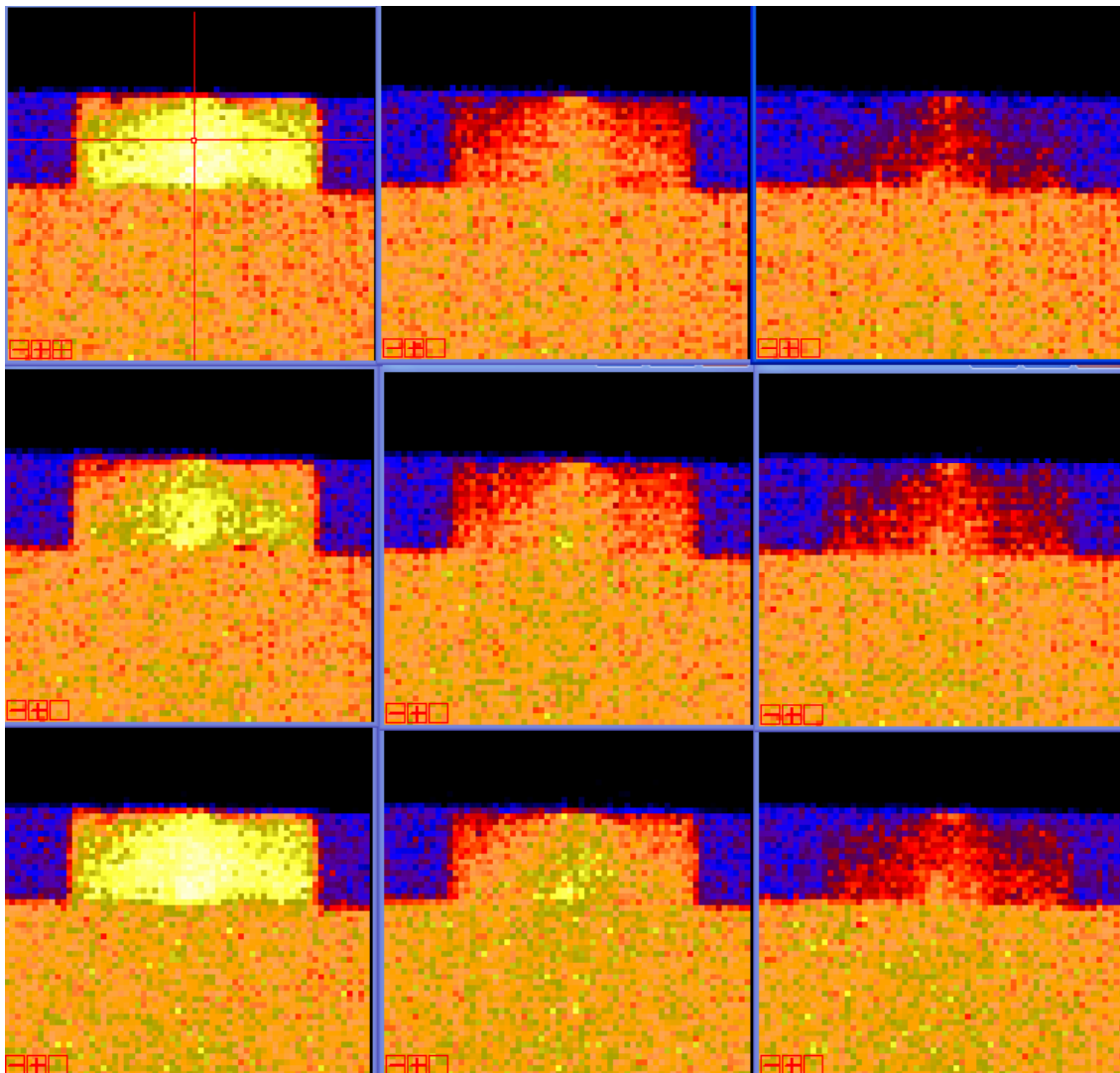


Figura 6.14: Evolución de la temperatura en función de la carga aplicada en AW 5754

- Para el material AA-2024-T3, se dispone de gráficas que relacionan la variación térmica en función de la deformación plástica en un punto concreto de la probeta. La primera de dichas gráficas se observa a continuación:

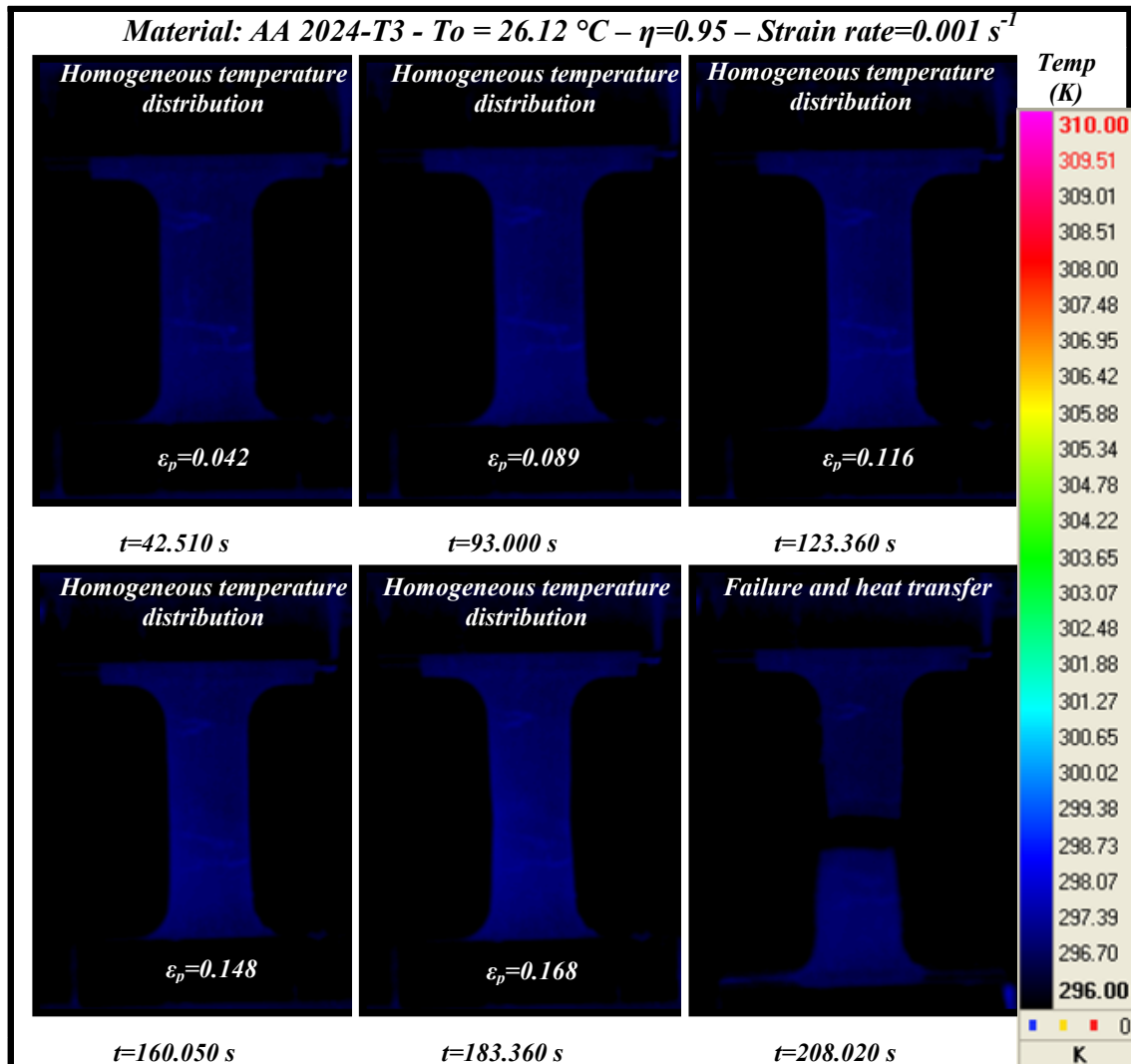


Figura 6.15: Variación térmica en función de su deformación plástica del material AA-2024-T3

La discusión de la variación térmica existente en dicha gráfica se puede observar en el próximo apartado del documento.

A continuación, se desarrolla la variación térmica en función de la deformación. En las siguientes gráficas se puede comprobar el efecto termoelástico, del cual se discute en el próximo apartado del documento:

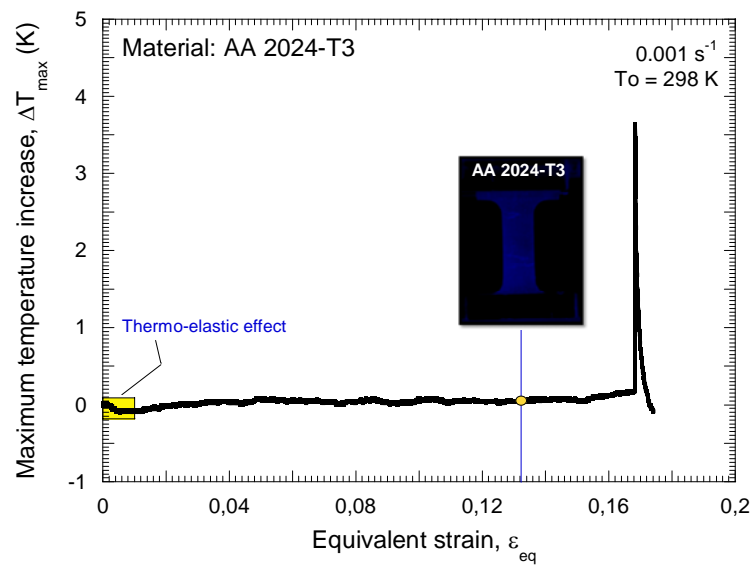


Figura 6.16: Efecto termoelástico del material AA-2024-T3

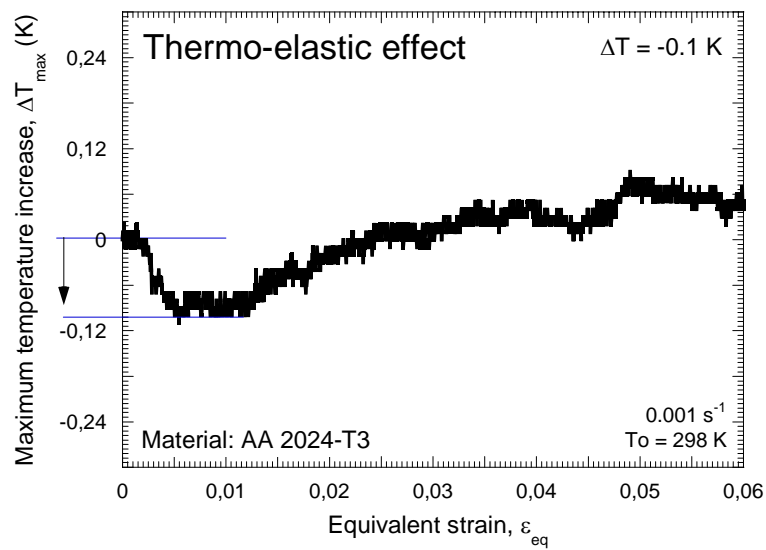


Figura 6.17: Detalle del efecto termoelástico del material AA-2024-T3

Para finalizar con el material AA-2024-T3, se ha calculado la ley tensión-deformación plástica para diferentes velocidades de deformación de la misma forma que se ha realizado en el apartado del material AW 5754:

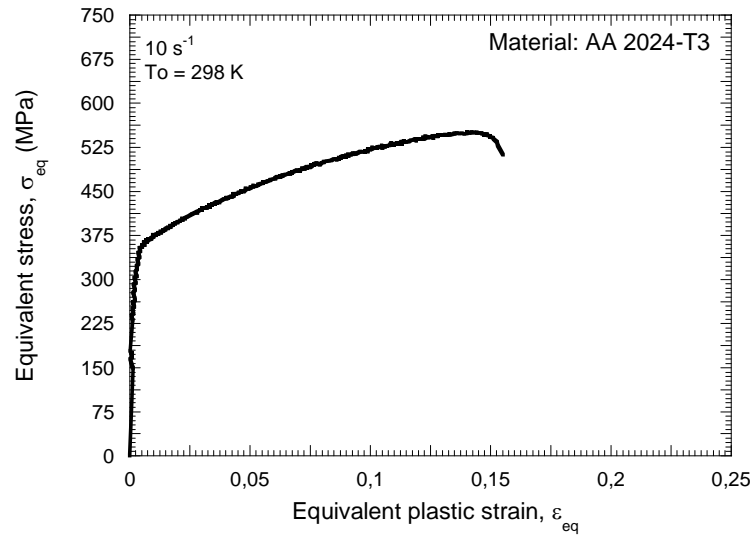


Figura 6.18: Ley tensión-deformación plástica del material AA-2024-T3 para una velocidad de 10 s^{-1}

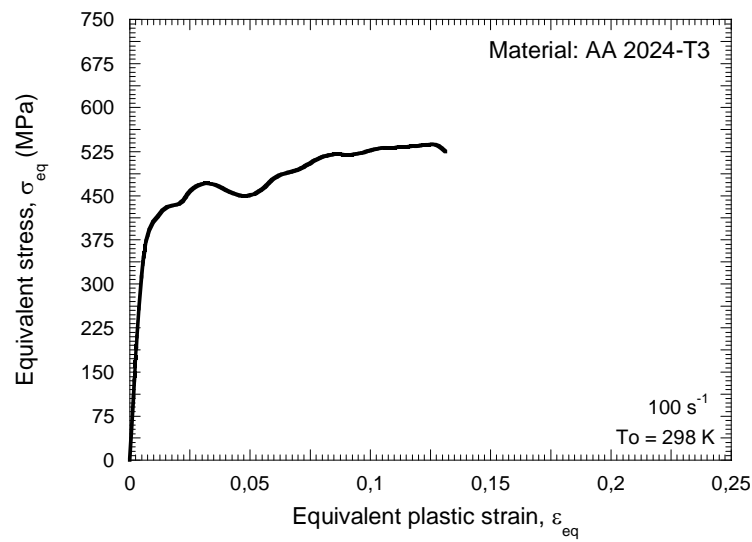


Figura 6.19: Ley tensión-deformación plástica del material AA-2024-T3 para una velocidad de 100 s^{-1}

- Por último, se adjuntan 3 gráficas de diferentes materiales, los cuales son también aleaciones metálicas, con sus respectivas leyes tensión-deformación. Dichas gráficas se adjuntan para realizar una comparación de estos 3 materiales con los otros 2 estudiados (AW 5754 y AA-2024-T3):

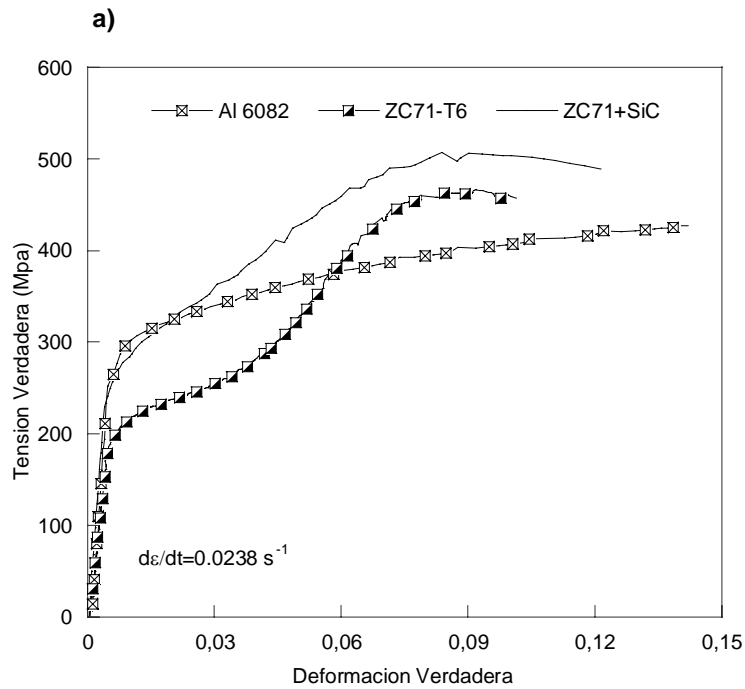


Figura 6.20: Ley tensión-deformación verdadera de 3 materiales diferentes.

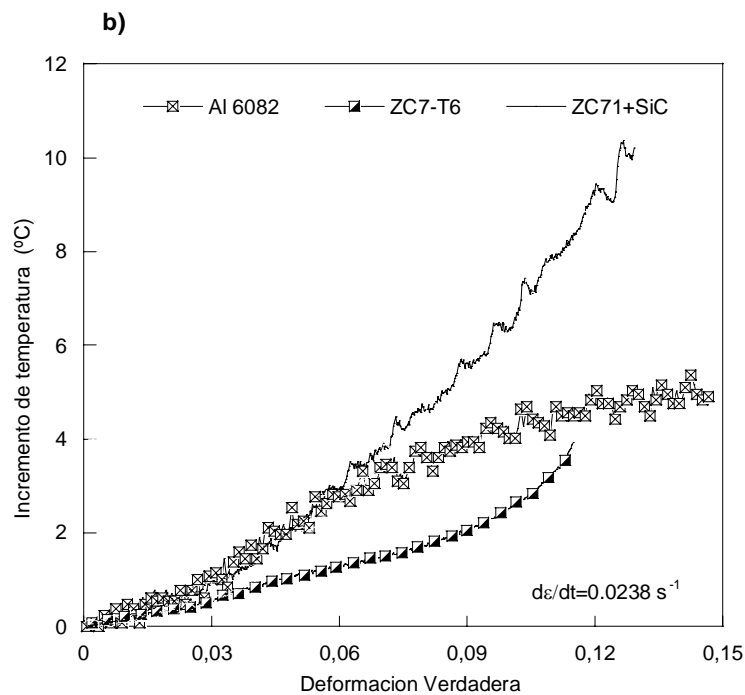


Figura 6.21: Gráfica incremento térmico vs deformación verdadera de 3 materiales diferentes.

CAPÍTULO 7

DISCUSIÓN

7.1. INTRODUCCIÓN

En dicho apartado se procede a realizar una discusión acerca de la comparación de los resultados teóricos y experimentales hallados en los distintos ensayos que se han realizado en el presente documento.

Uno de los principales puntos de discusión es la comparación entre la variación de temperatura existente debido a deformación elástica y plástica, existiendo diferencias entre ellas, que se exponen en la siguiente página del documento.

7.2. COMPARACIÓN RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES

Primero se procede a discutir los resultados existentes de los tres primeros ensayos del material AW 5754, sin captación de imágenes IR:

- La velocidad de deformación es un factor decisivo. Se observa que para valores de velocidad de deformación elevados (casos del ensayo nº1 y nº2) la variación térmica alcanzada es mayor que para valores de velocidad de deformación del ensayo nº3.
- El factor β para cada uno de los tres ensayos, es muy cercano al valor estimado en el apartado inicial de los resultados teóricos, ya que depende del valor del modulo de Young o modulo de elasticidad.
- Se ha calculado la variación térmica para valores de deformación plástica puesto que el efecto termoelástico permite que dichas variaciones térmicas sean mayores en términos de deformación plástica, debido a que las relaciones microestructurales en la pieza a deformar son más apropiadas a transformar dicha energía de deformación en calor que las relaciones existentes en una pieza deformada de forma elástica.

A continuación, se discuten los resultados obtenidos en el ensayo realizado con el material AW 5754, con captación de imágenes IR:

- Se puede observar un salto de variación térmica en la grafica adjuntada, debido al efecto que produce en la probeta el paso de deformación elástica (o efecto termoelástico) a deformación plástica.
- La grafica adjuntada se ha realizado en función del tiempo de adquisición de la cámara, puesto que dicho tiempo ha sido el asignado en el módulo Rdac del programa de adquisición de datos de Rtools de la cámara SC 6000.
- En la siguiente imagen, se representa una evolución del punto central de la probeta en función del tiempo y a su vez de la variación de tensión producida en esta.

El último punto de discusión es el de los ensayos realizados con el material AA-2024-T3, con captación de imágenes IR:

- La primera imagen que aparece es la evolución de la probeta desde que comienza el proceso de deformación hasta que se produce la rotura de ésta. Es una relación de la deformación plástica existente en la probeta en función del efecto mecánico que se produce en ella. Se observa, también, la evolución de la temperatura en la columna de la derecha.
- A continuación, se adjuntan dos gráficas que representa el efecto termoelástico del que se habla en dicho documento. Se observa que la variación térmica es menor en términos de deformación elástica que en términos de deformación plástica.
- Las dos últimas gráficas datan la ley tensión-deformación del material, en función de la deformación plástica, como se ha realizado en el primer punto de ensayos realizados con el material AW 5754. Se observa, por último, que el material AA-2024-T3 presenta unas propiedades mecánicas diferentes a las del material AW 5754, de ahí la diferencia entre ambas gráficas.

Para finalizar, se han adjuntado dos gráficas o leyes tensión-deformación de tres materiales diferentes, que sirven para explicar y entender el último punto de discusión existente en el documento.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES

8.1. INTRODUCCIÓN

Existen diferentes conclusiones en función de la dirección de éstas:

Sobre las técnicas y la metodología experimental:

- Se ha desarrollado una metodología que permite el ensayo de materiales metálicos en una máquina universal de ensayo con medición simultánea de variación térmica.
- La termografía infrarroja posibilita la medición del incremento térmico asociado a la deformación elástica y plástica tanto en condiciones cuasiestáticas como dinámicas.
- En la medición del incremento térmico es imprescindible una buena calibración de la cámara IR.
- Se ha diseñado y construido un sistema de ensayo constituido por una cámara de ensayo, una cámara oscura y un sistema de control de temperatura, todo ello acoplable tanto a la máquina universal como a los diferentes elementos de sujeción de la cámara y otros objetos.

Sobre los materiales:

- Se han utilizado dos tipos de materiales que difieren en su comportamiento mecánico.
- Se han obtenido las relaciones tensión-deformación a diferentes velocidades de deformación y temperatura de ensayo.

Sobre los análisis cuasiestáticos:

- Una mayor velocidad en el ensayo da lugar a un mayor incremento de temperatura. Este mayor incremento de temperatura se justifica por el hecho de que al aumentar la velocidad, la energía de deformación que absorbe el material es mayor y, por lo tanto el incremento de temperatura es, también, mayor.
- Una mayor temperatura de ensayo da lugar a un menor incremento de temperatura asociado a la deformación plástica. Este menor incremento de temperatura se justifica por el ablandamiento que sufre el material por efecto de la temperatura
- La evolución del incremento de temperatura medido con la cámara durante el ensayo muestra con exactitud los picos que aparecen en la gráfica fuerza-

desplazamiento. Este hecho sanciona la precisión de la medida del incremento térmico por deformación mediante tecnología infrarroja.

Sobre el procedimiento de obtención de los coeficientes de la ley tensión-deformación:

- EL INCREMENTO TÉRMICO ASOCIADO A LA DEFORMACIÓN ELÁSTICA ES UNA VARIABLE OBSERVABLE QUE PUEDE SER UTILIZADO EN LA DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LA LEY TENSIÓN-DEFORMACIÓN DE UN MATERIAL METÁLICO

8.2. ESTUDIOS FUTUROS

A continuación, se resume una lista de los futuros estudios que se pueden realizar con la metodología de la captación de imágenes mediante radiación infrarroja y con la metodología utilizada en dicho documento:

- Aplicar la termografía infrarroja a la localización de inestabilidades plásticas en procesos como el ensayo biaxial de placas, mecanizado de piezas, impacto balístico,...
- Modificar algunas características del sistema de medida diseñado como son la distancia cámara-probeta y el recubrimiento de probetas con pintura y/o con hollín.
- Aplicar en ensayos a baja temperatura el procedimiento propuesto de medida del incremento térmico.
- Aplicar la metodología propuesta al ajuste de otras leyes tensión-deformación.

8.3. APLICACIONES

Las **aplicaciones** de la **aleación AW 5754** son las siguientes:

- Estructuras soldadas para la industria nuclear, química y alimenticia.
- Hidráulica (calderería, tuberías, depósitos de expansión).
- Construcción de barcos, aplicaciones en alta mar.
- Estructuras arquitectónicas, anodizadas.
- Carrocería de un vehículo
- Electrodomésticos
- Remaches
- Postes de carreteras



Figura 8.1: Ejemplo de aplicaciones existentes de AW-5754



Figura 8.2: Depósitos de expansión de AW-5754

Las **aplicaciones** de la **aleación AA-2024-T3** son las siguientes:

- Accesorios de aeronaves
- Engranajes y ejes
- Pernos, piezas de reloj
- Partes de ordenadores
- Juntas, piezas de fusibles
- Órganos hidráulicos de válvulas
- Partes de misiles y municiones
- Pistones, partes del rectificador, engranajes helicoidales y elementos de sujeción
- Equipos veterinarios y ortopédicos
- Estructuras, etc



Figura 8.3: Aplicaciones de AA-2024-T3



Figura 8.4: Aplicaciones varias de AA-2024-T3

CAPÍTULO 9

BIBLIOGRAFÍA

A continuación se detallan los diferentes documentos de ayuda de dicho Proyecto Fin de Carrera:

- *“Obtención de leyes tensión-deformación de materiales viscoplásticos a partir de mediciones del incremento de temperatura asociado a su deformación plástica”*. Rolando Guzmán López, Tesis Doctoral.
- *“Numerical methods for radiative heat transfer”*. Guillem Colomer Rey, Doctoral Thesis.
- *“Thermoelastic Stress Analysis Systems for Industrial Applications”*. Simon H. Bichard and David M. Holifield, University of Wales Institute Cardiff.
- *“Thermoelastic Stress Analysis System Developed For Industrial Applications”*. Lars Magne Haldorsen, Institute of Mechanical Ingenieering, Aalborg University.
- *“Modelling and analysis of crack turning on aeronautical structures”*. Llorenç Llopart Prieto, Doctoral Thesis.
- *“Espectrometría de imagen en el infrarrojo: una contribución al estudio de las combustiones y a la teledetección de incendios forestales”*. José Manuel Aranda Gallego, Departamento de Física, Universidad Carlos III de Madrid.